



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra speciální geodézie

Vliv teploty na měřená data v inženýrské geodézii

**Influence of temperature on measured data in engineering
geodesy**

DISERTAČNÍ PRÁCE

Ing. Tomáš Suk

Doktorský studijní program: Geodézie a kartografie

Studijní obor: Geodézie a kartografie

Školitel: prof. Ing. Martin Štroner, Ph.D.

Praha, 2024

PROHLÁŠENÍ

Jméno doktoranda: Ing. Tomáš Suk

Název disertační práce: Vliv teploty na měřená data v inženýrské geodézii

Prohlašuji, že jsem uvedenou disertační práci vypracoval/a samostatně pod vedením školitele prof. Ing. Martin Štroner, Ph.D.

Použitou literaturu a další materiály uvádím v seznamu použité literatury.

V Praze dne 1. 5. 2024

.....
podpis

Poděkování

Především bych rád poděkoval mému školiteli prof. Ing. Martinovi Štronerovi, Ph.D. za úžasnou trpělivost, se kterou mně pomáhal u plánování, měření i výpočtů experimentů. Velké a neopomenutelné díky patří také mé ženě a oběma dcerám za pochopení mého vytížení během studia a zejména při psaní této práce. Speciální poděkování si zaslouží moje sestra, která mi pomáhala s jazykovou stránkou této práce. V neposlední řadě musím poděkovat také širší rodině, přátelům a kolegům z katedry za psychickou podporu i pomoc při měření, bez které by se tento výzkum ani tato práce nemohly realizovat.

Abstrakt

Práce pojednává o problematice refrakce, která do geodetických měření zanáší měřitelnou a významnou chybu. Zejména se zabývá její vertikální složkou, která se projevuje při měření převýšení. Práce a celý výzkum se zaměřují na měření teploty a jejího vertikálního gradientu, který je pro geodetickou refrakci signifikantní.

V první části se autor zabývá volbou teplotních čidel, záznamových zařízení a návrhu nosné a zároveň stínící konstrukce pro osazení teplotními čidly. Práce dále poskytuje zevrubný teoretický popis možností výpočtu vlivu refrakce ze znalosti teploty (a teplotního gradientu), a také jejich vzájemné porovnání.

Nejrozsáhlejší část práce je věnována realizovaným měřickým i výpočetním experimentům, které měly za úkol prozkoumat teplotní stavy panující v přízemní úrovni atmosféry, ve které se měření inženýrské geodézie odehrává. Tyto pokusy také verifikují, zamítají či zpřesňují některé předpoklady, které jsou při zohledňování refrakce v geodézii aplikovány (například předpoklad vertikální teplotní stratifikace, nebo velikost a stálost vertikálního gradientu).

V poslední části práce jsou prezentovány pokusy, které mají za cíl experimentálně ověřit aplikovatelnost zde uvedených výpočetních i měřických postupů pro potlačování vlivu refrakce na geodetická měření. Autor zde také prezentuje jím nově navrženou diferenční metodu, kterou teoreticky uvozuje, následně aplikuje a experimentálně ověřuje.

Klíčová slova

Refrakce, vertikální teplotní gradient, měření teploty, teplotní senzory, DRPV, diferenční metoda

Abstract

The Dissertation Thesis describes the problem of refraction that introduces a measurable and significant error into the geodetic measurements. In particular, it addresses its vertical component that manifests itself during measurements of elevations. The Thesis and the entire research focus on the measurement of temperature and its vertical gradient which is significant for the geodetic refraction.

In the first part, the Author describes the process of selection of temperature sensors, data logging devices, the design of shielding and insulation structure for sensors. The Thesis also contains a detailed description of various possible calculations of the refraction effect according to temperature (and the temperature gradient) and their comparison.

The most extensive part of the Thesis pursues the measurements and calculated experiments already made; these were designed to research the temperature conditions prevailing at the ground atmospheric level in which the engineering geodetic measurements take place. These experiments also verify, reject, or correct some of the assumptions that are applied during refraction corrections in geodesy (e.g., the assumption of vertical temperature stratification or size and stability of vertical gradient).

In the last part of the Thesis, the experiments are presented that focus on practical verification of calculation and measurement procedures for suppressing the influence of refraction on geodetic measurements listed above. Author hereby presents his newly designed difference method, describes it in theory, applies and then verifies it through experiments.

Key words

Refraction, vertical temperature gradient, temperature measurement, temperature sensors, DEPWP, differential method

Obsah

1	ÚVOD	- 9 -
2	CÍLE PRÁCE	- 12 -
3	STÁVAJÍCÍ STAV POZNÁNÍ.....	- 13 -
4	REFRAKCE	- 16 -
4.1	FERMATŮV PRINCIP	- 16 -
4.2	REFRAKCE Z POHLEDU GEODETA	- 21 -
4.2.1	<i>Vertikální refrakce</i>	<i>- 22 -</i>
4.2.2	<i>Horizontální refrakce</i>	<i>- 25 -</i>
5	TEPLOTA	- 26 -
5.1	MĚŘENÍ TEPLoty.....	- 26 -
5.1.1	<i>Dilatační čidla kapalinová.....</i>	<i>- 26 -</i>
5.1.2	<i>Teploměry radiační (infračervené).....</i>	<i>- 27 -</i>
5.1.3	<i>Teploměry odporové.....</i>	<i>- 28 -</i>
5.1.4	<i>Termoelektrický teploměr (termočlánek)</i>	<i>- 31 -</i>
5.2	OBTÍŽE PŘI MĚŘENÍ TEPLoty VZDUCHU	- 32 -
5.3	NÁVRH METODY MĚŘENÍ TEPLoty A TEPLotNÍHO GRADIENTU	- 34 -
6	POUŽITÁ APARATURA PRO MĚŘENÍ TEPLoty.....	- 37 -
6.1	ČIDLA.....	- 37 -
6.1.1	<i>Odporová čidla.....</i>	<i>- 37 -</i>
6.1.2	<i>Čidla drátková – termočláanky.....</i>	<i>- 38 -</i>
6.2	KONSTRUKCE.....	- 39 -
6.2.1	<i>První konstrukce pro termočláanky</i>	<i>- 39 -</i>
6.2.2	<i>Druhá konstrukce.....</i>	<i>- 40 -</i>
6.3	ZAŘÍZENÍ PRO REGISTRACI DAT (LOGGERy)	- 42 -
6.3.1	<i>Datalogger LUTRON BTM-4208SD.....</i>	<i>- 43 -</i>
6.3.2	<i>Datalogger S 0141</i>	<i>- 43 -</i>
6.3.3	<i>Datalogger U0141</i>	<i>- 44 -</i>
6.3.4	<i>Software Comet Vision</i>	<i>- 45 -</i>
6.4	ROZBOR PŘESNOSTI PRO ODPOROVÁ ČIDLA.....	- 47 -
7	VÝPOČET VLIVU REFRAKCE NA PŘEVÝŠENÍ	- 49 -
7.1	INDEX LOMU VZDUCHU	- 49 -
7.2	TEPLotNÍ GRADIENT	- 51 -
7.2.1	<i>Výpočty vlivu refrakce ze znalosti teplotního gradientu</i>	<i>- 52 -</i>
7.3	VÝPOČET VLIVU REFRAKCE POMOCÍ DIFERENČNÍ METODY.....	- 62 -
7.3.1	<i>Základní matematický princip.....</i>	<i>- 62 -</i>
7.3.2	<i>Strojové učení</i>	<i>- 64 -</i>
8	MĚŘICKÉ EXPERIMENTY.....	- 69 -
8.1	PRVNÍ EXPERIMENTY – TERMOČLÁNKOVÁ ČIDLA	- 69 -
8.1.1	<i>Nastavení experimentu.....</i>	<i>- 69 -</i>
8.1.2	<i>Ukázkové měření 27. 7. 2018.....</i>	<i>- 70 -</i>
8.1.3	<i>Kalibrace termočláankových čidel</i>	<i>- 73 -</i>
8.1.4	<i>Závěry experimentu</i>	<i>- 75 -</i>
8.2	KOMBINAČNÍ MĚŘENÍ.....	- 76 -
8.2.1	<i>Nastavení experimentu.....</i>	<i>- 76 -</i>



8.2.2	Test rychlosti odezvy zapouzdřených čidel.....	- 76 -
8.2.3	Měření.....	- 77 -
8.2.4	Výsledky	- 78 -
8.2.5	Závěry experimentu	- 79 -
8.3	PERIODICKÉ ROČNÍ MĚŘENÍ.....	- 79 -
8.3.1	Nastavení experimentu.....	- 79 -
8.3.2	Test rychlosti odezvy zalitých čidel.....	- 80 -
8.3.3	Měření.....	- 81 -
8.3.4	Výsledky	- 86 -
8.3.5	Závěry experimentu	- 94 -
8.4	EXPERIMENT HORIZONTÁLNÍ STABILITY TEPLoty	- 94 -
8.4.1	Nastavení experimentu	- 95 -
8.4.2	Rozbory přesnosti.....	- 95 -
8.4.3	Výsledky	- 96 -
8.4.4	Závěry experimentu	- 98 -
8.5	EXPERIMENTY SE ČTYŘMETROVOU KONSTRUKCÍ	- 98 -
8.5.1	Nastavení experimentu.....	- 99 -
8.5.2	Výsledky nad travnatým povrchem.....	- 99 -
8.5.3	Výsledky nad asfaltem	- 101 -
8.5.4	Závěry experimentu	- 102 -
8.6	EXPERIMENT NUMERICKÉHO POTLAČENÍ VLIVU REFRAKCE	- 102 -
8.6.1	Nastavení experimentu	- 103 -
8.6.2	Měření.....	- 104 -
8.6.3	Výsledky měření	- 105 -
8.6.4	Výpočet posunů.....	- 112 -
8.6.5	Závěry experimentu	- 116 -
8.7	MĚŘENÍ OVĚŘUJÍCÍ HOMOGENITU TEPLOTNÍHO GRADIENTU – MĚŘENÍ 4 SOUPRAVAMI	- 117 -
8.7.1	Nastavení experimentu.....	- 117 -
8.7.2	Výsledky měření 11. 6. 2023	- 118 -
8.7.3	Výsledky měření 21. 7. 2023	- 121 -
8.7.4	Závěry experimentu	- 123 -
8.8	UPRAVENÝ EXPERIMENT POTLAČENÍ VLIVU REFRAKCE	- 124 -
8.8.1	Nastavení experimentu.....	- 124 -
8.8.2	Měření.....	- 126 -
8.8.3	Výsledky měření	- 126 -
8.8.4	Výpočet posunů.....	- 134 -
8.8.5	Závěry experimentu	- 154 -
9	ZÁVĚR.....	- 155 -
10	ZDROJE.....	- 159 -
11	SEZNAM OBRÁZKŮ	- 164 -
12	SEZNAM TABULEK	- 168 -
13	SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ	- 170 -
14	SEZNAM ELEKTRONICKÝCH PŘÍLOH	- 171 -



1 Úvod

Měření teploty za cílem zpřesnění výsledných veličin již dlouho patří k postupům, které jsou v případě přesné (milimetrové) geodézie běžně používány. Teplota jakožto veličina nám ovlivňuje hned několik aspektů měření.

Zprvė měřený objekt samozřejmě reaguje na teplotní roztažnost. Zejména u kovových konstrukcí nebo dílců je třeba s tím počítat a zavádět vhodné opravy nebo vhodně volit dobu měření, aby se vliv roztažnosti potlačil nebo byl alespoň systematický v rámci měření.

Druhou stránkou je vliv na samotná měřidla. I ta jsou ovlivněna teplotní roztažností. V tomto případě je samozřejmě v geodetické praxi nejčastěji zmiňováno pásmo. U ocelových pásem je nutné zavádět opravy z prodloužení, jelikož koeficient teplotní délkové roztažnosti ocele se pohybuje okolo $12 \cdot 10^{-6} K^{-1}$. Reakcí na potřebu přesného měření se stalo používání invaru (slitina železa a niklu), který má jen velmi malý koeficient teplotní délkové roztažnosti (cca $1,2 \cdot 10^{-6} K^{-1}$), takže je pro většinu měření možné vliv teplotní roztažnosti zanedbat. Teplotní roztažnost samozřejmě ovlivňuje i další pomůcky jako jsou nivelační latě, výtyčky, stativy anebo dřívě používané základnové latě. Tyto nedostatky jsou v praxi dost často řešeny použitím vhodného materiálu (dřevo, invar, dutý profil).

Dalším případem, kdy teplota negativně ovlivňuje měření délek, je změna rychlosti paprsku procházejícího atmosférou. Při měření jakékoli vzdálenosti pomocí elektronického dálkoměru dochází k ovlivnění rychlosti paprsku procházejícího prostředím o různé hustotě, která je samozřejmě vyšší než vakuum. Nejvýraznější vliv za běžných okolností má právě teplota. Z tohoto důvodu je většina moderních totálních stanic vybavena možností zadávat do přístroje teplotu, tlak, popřípadě i vlhkost. Přístroj pak na tyto veličiny aplikuje tzv. firemní rovnice, které pracují s hodnotami danými při kalibraci a na základě těchto rovnic dopočítávají opravy pro naměřené vzdálenosti. Výhodou i nevýhodou je, že měřič ani zpracovatel v podstatě neví, jakým způsobem tento výpočet probíhá, a jsou mu poskytována až výsledná data. V praxi bývá zvykem u přesnějších prací určit teplotu na začátku měření pomocí klasického teploměru s přesností okolo 1–2 °C. V případě dlouhodobějšího měření by ovšem bylo vhodnější teplotu zadávat průběžně s tím, jak se vyvíjí během dne. O tom, jak moc se teplota v našich podmínkách může v přízemní úrovni atmosféry měnit, bude také hovořeno dále, jelikož takových výzkumů přímo souvisejících s geodézií zatím nebylo provedeno mnoho.

Nicméně všechny výše zmíněné obtíže pramenící z teploty (a její změny) během měření jsou již v geodetické literatuře dostatečně popsány a jejich odstraňování je i v běžné praxi aktivně užíváno (a za normálních okolností s dostatečnou přesností). Proto se celá tato práce soustřeďuje na poslední velký problém související s teplotou a tím je refrakce.

Refrakce jako taková znamená změnu dráhy záření (zakřivení) při průchodu nehomogenním prostředím a v důsledku působí na měřené úhly. Jednoduše řečeno paprsek vyslaný pod daným úhlem nedopadne v odpovídajícím úhlu na odpovídající místo, ale je mírně zakřiven a tím se změní místo jeho dopadu a úhel dopadu.



To v geodetickém smyslu znamená, že obraz bodu, na který cílím, se mi zdánlivě jeví na jiném místě, než na kterém bod skutečně je. Tudíž cílím na nesprávné místo, což způsobuje v případě měření totální stanicí chybu při měření zenitového úhlu a vodorovného směru. Teoreticky dochází z důvodu zakřivení dráhy i ke změně měřené vzdálenosti, to ovšem vzhledem k plochosti refrakční křivky není pro geodetické zpracování dat významné. U měření nivelace jde pro změnu o to, že se čtení na lati zdánlivě posune, a tak dochází k zavedení chyby do odečtu.

Mnoho geodetických metod přímo počítá s nepříznivým vlivem atmosférické refrakce a snaží se je principem měření vyloučit či potlačit. Jednoduchým příkladem může být měření osnovy směrů včetně měření zenitových úhlů, kdy se při měření čtou zpravidla obě polohy dalekohledu ihned po sobě. To je rozdílné oproti odečítání vodorovných směrů, které se čtou postupně nejprve všechny v první a poté ve druhé poloze dalekohledu. Měření poloh ihned po sobě je vhodnější zejména proto, že atmosféra se neustále vyvíjí a s tím se mění i velikost jejího vlivu. Odečítáme-li tedy měření v krátkém intervalu, pak se teoretická chyba způsobená refrakcí projeví v obou polohách stejně (jeví se jako systematická). Tudíž se nevyloučí, jak je občas nesprávně interpretováno, ale je možné posuzovat výsledky měření z hlediska přesnosti (obě polohy jsou numericky vůči sobě správné).

Příkladem nebezpečí souvisejícího s refrakcí při běžném geodetickém měření polární metodou může být například snaha o přesné měření pomocí minihranolu. V případě, kdy je použita standardní výtyčka osazená hranolem, příliš nedochází k průchodu paprsku nižší výškou nad terénem (do 0,5 m), pokud to není způsobeno měřením přes překážku. Při měření na minihranol, nebo formou bezhranolového měření tento stav nastává a je potřeba si uvědomit rizika s tím související. Aktuálně panuje přesvědčení, že měřením na minihranol se docílí vyšší přesnosti, což vychází z předpokladu kvalitnějšího provedení a nižší výšky výtyčky (často jen hrot 10 cm či méně). V případě, kdy měříme například na rozpáleném monolitickém betonu nebo železné konstrukci, se průchod paprsku velmi přiblíží povrchu. S tím souvisí výraznější teplotní gradient způsobeným sáláním tepla z podkladu a tím i výraznější vliv refrakce.

Dalším příkladem z praxe, kdy je potlačován vliv refrakce, je princip geometrické nivelace, přesněji řečeno doporučený technologický postup pro nivelaci ze středu. V něm se mimo jiné uvádí, že záměry by neměly dosahovat nižší výšky nad terénem než 30 cm pro technickou nivelaci, nebo 50 cm u nivelace přesné (v případě kratších záměrů ve svažitém terénu 25 cm) [1]. I zde jde o potlačení vlivu refrakce vhodně zvoleným postupem měření. V případě nivelace, obzvláště u přesné a vyšší úrovně, se niveluje zpravidla formou pořadů vedených velmi často po komunikacích, které umožňují pohodlnější měření a především mají vhodný spád. Bohužel zpevněné komunikace (asfaltové silnice) vykazují v létě velmi silné tepelné sálání, které způsobuje výrazný teplotní gradient v přízemní úrovni atmosféry. Tyto nepříznivé vlivy jsou prakticky ověřeny, a proto jsou podchyceny v "Technologickém postupu pro technickou nivelaci" vydaným ČÚZK v roce 1984. V případě nivelace ze středu, která je z důvodů vylučování nebo potlačování vlivu nedokonalé vodorovnosti záměrně přímky a vlivu zakřivení Země nejpoužívanější, se často dočteme, že vhodnou volbou stanovisek je možné potlačit i refrakci. To je možné očekávat například při měření, kdy stále postupuje po víceméně vodorovném terénu a nad stejným materiálem. V takovém případě lze očekávat, že vliv refrakce působící na záměru vzad je prakticky



stejný jako vliv refrakce působící na záměru vpřed (pokud jsou záměry realizovány během krátkého časového úseku). Pokud ovšem celý pořad například stoupá a záměra vzad je vždy výrazně vyšší než záměra vpřed, pak prochází záměry jinou částí atmosféry s jiným teplotním gradientem a výsledky jsou zatíženy v principu systematickou chybou.

Výslednou otázkou zůstává, jak mnoho mohou být výsledná data ovlivněna vlivy refrakce a zda jsou uvedená opatření dostačující, nebo naopak zda nejsou příliš přehnaná. Vzhledem k tomu, že zatím nedošlo k rozsáhlejšímu výzkumu chování teploty v přízemní úrovni atmosféry (ve které se drtivá většina geodetických měření odehrává), bude právě přímému měření teploty, teplotního gradientu a celkovému chování teplotního pole věnována velká část této práce.



2 Cíle práce

Na začátek je vhodné uvést, že výzkum předcházející sepsání této práce spadá do značné míry do kategorie základního výzkumu. V tomto případě především experimentálního stanovení základních principů a stavů teploty v přízemní úrovni atmosféry a ověřování některých zažitých předpokladů. V průběhu tohoto výzkumu nastal několikrát stav, kdy došlo k poměrně nečekanému výsledku, který například odporoval zažitým předpokladům. V návaznosti na toto odhalení bylo postupně upravováno směřování dalšího výzkumu a navržení následujících experimentů. Z toho důvodu také došlo k mírnému odklonu od prvotní vize a stanovených cílů (související s měřením teploty za účelem odhalování vlivu refrakce) ke konkrétnímu měřickému a výpočetnímu postupu cíleného na potlačování vlivu refrakce. Obecně lze zapsat cíle této práce v následujících bodech:

1. Navržení vhodné aparatury pro měření teploty a vertikálního teplotního gradientu v přízemní úrovni atmosféry. Volba čidel, záznamníků a návrh praktického způsobu osazení s omezením dalších vlivů – návrh nosné a stínící konstrukce.
2. Stanovení vhodného postupu pro měření teploty atmosféry s ohledem na specifické potřeby navazujících výpočtů.
3. Provedení rozsáhlé série měření v přízemní úrovni atmosféry za účelem sběru primárních teplotních dat při různých podmínkách měření (denní doba, roční doba, povětrnostní podmínky, materiál povrchu, nad kterým se provádí měření...).
4. Ověření předpokládaných jevů panujících v teplotním poli (zejména vertikální teplotní stratifikace, denní teplotní trend, horizontální teplotní gradient).
5. Stanovení obecně platných předpokladů a stavů panujících v rámci teplotního pole v přízemní úrovni atmosféry.
6. Volba a úprava či navržení vhodných výpočetních postupů a funkčních vztahů umožňující z naměřených teplotních dat výpočet chyby způsobenou refrakcí v geodetickém smyslu.
7. Vytvoření výpočetních algoritmů a skriptů pro zpracování naměřených teplotních dat a následnou simulaci průchodu paprsku nehomogenním prostředím – určení skutečné dráhy paprsku.
8. Posouzení uvedených jevů v 4. a 5. z hlediska vlivu na refrakci a na geodetické měření jako takové.
9. Navržení a realizace experimentu ověřujícího funkčnost nově navržených i převzatých výpočetních postupů.
10. Pokud to bude možné, tak navržení prokazatelně funkčního postupu měření a zpracování dat (teplotních i geodetických) s cílem potlačení či odstranění vlivu refrakce.



3 Stávající stav poznání

Jak již bylo zmíněno výše, mnoho stávajících geodetických metod přímo počítá s nepříznivým vlivem atmosférické refrakce a snaží se je principem měření vyloučit či potlačit. Nicméně prostorová polární metoda, jedna z nejpoužívanějších metod v dnešní geodézii, je tomuto vlivu prakticky vystavena přímo, jelikož refrakce ovlivňuje zejména měření zenitových úhlů, a tak se projevuje především při trigonometrickém určování převýšení (výšek), jak bude popsáno dále.

V minulosti byla vymyšlena a publikována řada experimentů a měření, která měli za cíl odhalit vliv refrakce nebo jej dokonce potlačit. Většina z nich se nedočkala praktického použití z mnoha důvodů. V současnosti vzhledem k rychlému technickému pokroku, při kterém se geodetické přístroje neustále vyvíjejí a zdokonalují, vzniká mnohem významnější tlak na to, aby byly tyto vlivy potlačovány. U současných kvalitních totálních stanic není směrodatná odchylka dálkoměru 1 mm (na 100 m) výjimkou a přesnost měřených úhlů se již pohybuje v řádu desetin miligonu (například zde [2][3][4][5]). Díky tomu je již možné provádět měření s přesností na milimetry nebo ve speciálních aplikacích i na desetiny milimetru. Podmínkou dosažení těchto přesností však není jen kvalita použitého přístroje, případně zvýšení počtu nadbytečných měření, ale také potlačení či odstranění chyb systematických, které nejsou zpravidla vyšším počtem opakování potlačeny. Mezi takové chyby v jistém smyslu patří i vliv prostředí. Jednou z hlavních částí vlivu prostředí na geodetická měření je bezesporu i v geodézii dlouhodobě studovaná atmosférická refrakce.

Pokusy o potlačení nebo odstranění vlivu lomu jsou velmi staré a v průběhu minulého století bylo na toto téma navrženo a sepsáno mnoho teorií (popsaných například v [6]) a proveden nespočet často i speciálně navržených experimentů (například pokus s laserovou záměrnou přímkou [7]). Ve starších pracích se vliv refrakce řeší zejména ve spojitosti s velkými trigonometrickými sítěmi měřenými v horských oblastech. Speciální postavení z hlediska výzkumu refrakce zde zastává měření Gausse v Hannoverském království v první polovině 19. století, při kterých byl určen „slavný“ refrakční koeficient 0,1306 [8]. Podobná ale historicky mladší měření prováděl s přihlédnutím k vlivu refrakce v 60. a 70. letech minulého století Hradílek (např. [9] a [10]). Tento druh výzkumu je nicméně stále aktuální, jak dokládá např. publikace [11]. Další modernější článek popisuje vliv refrakce na geodetická měření v případě průchodu jiným médiem, a to vodou [12]. V zásadě lze toto úsilí o popsání vlivu refrakce rozdělit do několika základních skupin.

První skupinou je přímé využití klasického geodetického měření pro detekci refrakce a jejího vlivu. Nejčastěji se jedná o protisměrná měření zenitových úhlů nebo výpočet refrakčního koeficientu k v rámci dané trigonometrické (geodetické) sítě [13][14]. Zajímavým a inovativním způsobem měření protisměrných zenitových úhlů se zabývá např. pan Hirt v [15], kdy je díky automatickému cílení uskutečněno skutečné současné měření protisměrných úhlů.

Další možností je aplikace atmosférických modelů na naměřená data. Jedním z nejznámějších modelů je teplotní rovnice, kterou odvodil Kukkamaki [16], sloužící pro opravy přesné nivelace. Existují také úpravy tohoto vztahu pro různé oblasti a použití [17]. Na území ČSSR také proběhl v 80. letech výzkum teplot panujících



nad silnicemi s cílem potlačení vlivu refrakce na velmi přesnou nivelaci [18]. Vlivem refrakce na nivelační měření se zabývá také [19]. Popisem matematických i praktických omezení při použití Kukkamakiho rovnice se zabývá [20][6].

V současné době je často používán reverzní výpočet počítačového modelu, při kterém se z naměřených dat zpětně odvozují teoretické vztahy mezi naměřenými geodetickými daty a parametry definujícími stav atmosféry (za pomoci aproximací polynomy, metodou nejmenších čtverců či jinými zejména statistickými způsoby) [21][22]. V takových případech narážíme na problém, že odvozené vztahy jsou často pouze teoretické a platí pouze pro daný experiment. Jelikož je obecně nelze aplikovat v různých ročních obdobích anebo na odlišných místech měření.

Dalším přístupem, se kterým se setkáváme, je stanovení okamžitých parametrů definujících turbulentní atmosféru uvedených ve známé teorii podobnosti Monin–Obukhov (popsané v [23] a [24]). Podle této teorie je pro výpočet indexu lomu důležité změřit či vypočítat turbulentní parametry C a l . Oba tyto parametry je možné dle dané teorie určit použitím scintilometrie anebo metodou Image dancing [25][26][27]. Moninova–Obukhovova metoda je prakticky limitována jejími předpoklady. Zejména se zde jedná o předpoklad rovnoměrného rozvrstvení atmosféry (ačkoli existují i modifikace vztahů [25]) a především je nejisté využití koeficientu k , který představuje teplotní gradient konstantní pro celou dráhu paprsku, případně celý soubor měření. V současné době je již tato metoda považována za nedostatečnou.

Na výčet metod snažících se odhalit vliv refrakce navazuje technologicky velmi náročná disperzní metoda (popsaná v [26][27]), která je založena na použití dvojice paprsků různých vlnových délek (nejčastěji ve spektru IR a modré barvy), které se mírně odlišně lámou (zakřivují). Tento princip se projeví i při průchodu atmosférou a je tedy možné změřit rozdíl mezi body (úhly) dopadu jednotlivých paprsků různých vlnových délek. Z toho je následně možné odvodit refrakční koeficient nebo vliv refrakce jako takové. Technologická náročnost metody spočívá v nutnosti měřit velmi malý rozdíl mezi body (úhly) dopadu jednotlivých paprsků s dostatečnou přesností [28].

Postupy použité v této práci se z části liší od výše popsaných metod. Velká část práce se věnuje zkoumání fyzikálních vlastností přízemní úrovně atmosféry. Z níže uvedených rozborů i z dříve publikovaných výzkumů (např. [29]) vyplývá, že dominantní vliv zde zastává právě teplota. Zkoumané parametry a principy (teplota, teplotní gradient, teplotní rozvrstvení atmosféry) slouží k pochopení jevů, které se v přízemní úrovni atmosféry odehrávají a které ovlivňují geodetická měření. Teplota a její gradient prakticky popisují v daný čas okamžitý stav atmosféry, který je následně simulován v počítačovém modelu. Podobné myšlenky sledoval například výzkum [30] popisující vhodnost náhradních teplotních funkcí ve vertikálním směru. Základem tohoto výpočtu je znalost indexu lomu vzduchu a jeho gradientu. Index lomu závisí při klasických podmínkách především na teplotě a tlaku. Při měření na krátké vzdálenosti (jako je obvyklé v inženýrské geodézii) se tlak prakticky nemění (není ovlivněn gradientem indexu lomu). Hlavní vliv má teplotní gradient, který je určován soustavou teplotních čidel umístěných na vertikální konstrukci speciálně navržené pro dané experimenty. V minulosti již byly pokusy provést taková měření a experimenty, ale obecně se jednalo o výrazně menší soubory měření s horším technickým vybavením (např. Sirůčková [31] a další) a zejména se snahou určovat



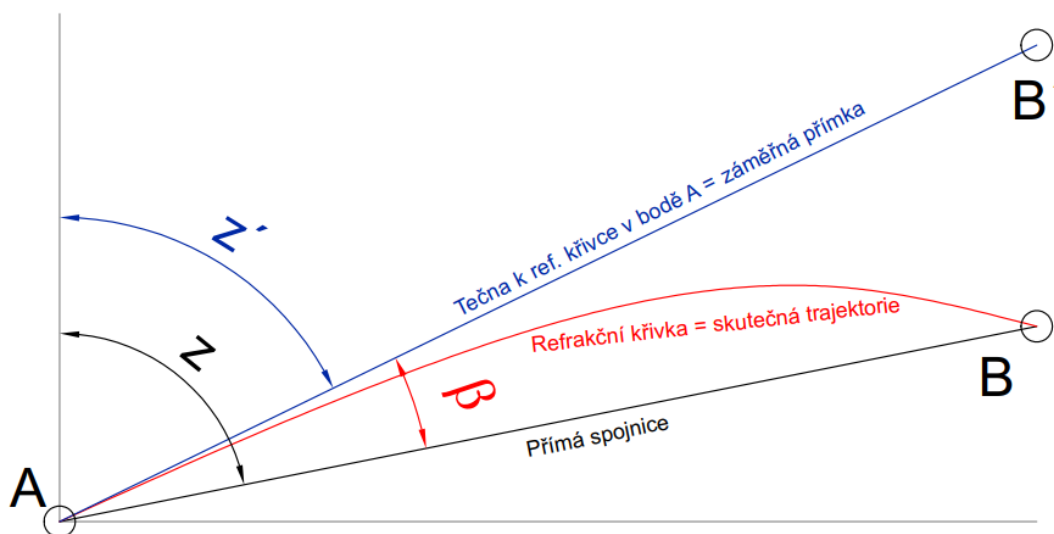
skutečné korekce měření. V první části výzkumu je spíše snaha prokázat vlastnosti a zákonitosti jevů, které se odehrávají v přízemní vrstvě atmosféry, a následně se z nich poučit a případně navrhnout další postupy.

Potlačení vlivu refrakce v obecné úrovni je velmi složitou problematikou, jak dokazují dosavadní pokusy a teze. V rámci této práce bylo několik možností při pokusech testováno. Skutečná „oprava“ převýšení pro konkrétní variantu geodetické úlohy (měření zátěžové zkoušky) byla získána až použitím nové diferenční metody. Ta vychází zejména z experimentálně zjištěných jevů a stavů popisujících přízemní úroveň atmosféry, které jsou v této práci v rámci měřených experimentů publikovány. Samotná metoda je zde popsána (7.3) a prakticky ověřena v posledním experimentu práce (8.8).



4 Refrakce

Pod pojmem refrakce (zlom) se skrývá vliv nehomogenity prostředí na směr (dráhu) paprsku (elektromagnetického vlnění). Elektromagnetické záření se šíří po časově nejvhodnější trajektorii. Pokud se šíří vakuem (nebo homogenním prostředím), pak je dráhou přímá spojnice. Refrakce nastává v případě, že paprsek procházející nehomogenním médiem (v rámci geodetických úloh atmosférou) a vlivem toho se jeho dráha zakřivuje. Paprsek se tedy obecně nešíří po přímce, ale po refrakční křivce, která je zcela obecná, jak je zobrazeno na Obr. 1.



Obr. 1 Základní princip refrakce ve 2D prostoru

To prakticky způsobuje, že se celkový obraz pozorované situace posouvá či deformuje. Na obrázku Obr. 1 je znázorněn vertikální zdánlivý posun bodu B pozorovaný z bodu A. Přičemž skutečný zenitový úhel z je vlivem refrakce pozorován jako úhel z' , který je definován tečnou k refrakční křivce v bodě A. Chyba úhlu z se nazývá refrakční úhel a je zde označena jako β .

Příkladem běžně pozorovatelné atmosférické refrakce může být zrcadlení obrazu nad rozpálenou vozovkou, fata morgána typická pro pouštní oblasti, deformace a vlnění obrazu při otevření okna v zimě nebo také fakt, že západ slunce pozorujeme v době, kdy je reálně slunce již pod horizontem.

4.1 Fermatův princip

Refrakci popisuje známý Fermatův princip, který zní: „Světlo se mezi dvěma body šíří po takové dráze, aby ji urazilo za nejkratší dobu.“ Respektive matematicky přesněji by bylo: „Světlo se v prostoru šíří z jednoho bodu do druhého po takové dráze, aby doba potřebná k proběhnutí této dráhy nabývala extrémní hodnoty.“ Extrémní hodnota je v případě geodézie hodnotou minimální. To znamená, že se světlo bude v nehomogenním prostředí šířit po obecné refrakční křivce a nikoli po přímce.



Matematicky lze refrakci odvodit následovně skrze Fermatův princip. Pokud vyjdeme ze základního vztahu pro rychlost v

$$v = \frac{s}{T}, \quad (4.1)$$

kde s je dráha a T translační doba, pak v diferenciálním tvaru můžeme zapsat translační dobu $T_{A,B}$ mezi body A a B pomocí integrálu

$$T_{A,B} = \int_A^B \frac{ds}{v} = \frac{1}{c} \cdot \int_A^B n(s) \cdot ds, \quad (4.2)$$

kde v je okamžitá rychlost světla v daném prostředí, c je rychlost světla ve vakuu, n je index lomu závislý na bodě dráhy s a ds je element dráhy.

Veličina optická dráha reprezentuje dráhu optického záření, kterou by toto záření urazilo ve vakuu během stejné doby potřebné k uběhnutí dané geometrické dráhy. Optická dráha $L_{A,B}$ je tedy logicky dána vztahem

$$L_{A,B} = \int_A^B n(s) \cdot ds. \quad (4.3)$$

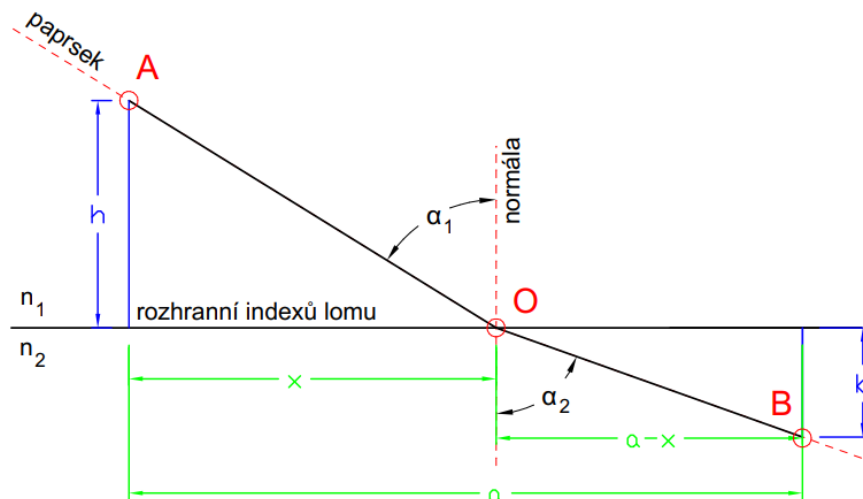
Pokud hledám nejrychlejší translační dobu, pak hledáme extrém (minimum) optické dráhy. To lze obecně zapsat pomocí variace optické dráhy rovné nule.

$$\delta L_{A,B} = \delta \int_A^B n(s) \cdot ds = 0. \quad (4.4)$$

Tento zápis je současně základní formulací Fermatova principu.

Pokud uvážíme Fermatův princip pro jednoduchý lom mezi dvěma prostředími, viz Obr. 2, pak můžeme vyjádřit části nejkratší dráhy mezi body A a B jako $S_{A,O}$ v prostoru o indexu lomu n_1 a $S_{O,B}$ v prostoru o indexu lomu n_2

$$S_{A,O} = \sqrt{h^2 + x^2}, \quad S_{O,B} = \sqrt{b^2 + (a - x)^2}. \quad (4.5)$$



Obr. 2 Fermatův princip pro lom

Z toho vyplývá, že doba k překonání celkové dráhy $S_{A,B}$ se vypočítá pomocí rychlostí v obou prostředích v_1 a v_2 .

$$T_{A,B} = \frac{S_{A,O}}{v_1} + \frac{S_{O,B}}{v_2} = \frac{\sqrt{h^2 + x^2}}{v_1} + \frac{\sqrt{b^2 + (a-x)^2}}{v_2}. \quad (4.6)$$

Samotný požadavek minimálního času je pak dán podmínkou vyjádřenou derivací

$$\frac{dT_{A,B}}{dx} = 0 = \frac{x}{v_1 \cdot \sqrt{h^2 + x^2}} + \frac{-(a-x)}{v_2 \cdot \sqrt{b^2 + (a-x)^2}} \quad (4.7)$$

Zde můžeme zavést substituce za siny úhlů α_1 a α_2

$$\sin(\alpha_1) = \frac{x}{\sqrt{h^2 + x^2}}, \quad \sin(\alpha_2) = \frac{(a-x)}{\sqrt{b^2 + (a-x)^2}}. \quad (4.8)$$

A tím dostáváme Snellův zákon lomu definující změnu úhlu při šíření vlnění (světla) přes rozhraní mezi dvěma prostředími o různém indexu lomu. V tomto případě vyjádřený pomocí změny rychlosti.

$$\frac{\sin(\alpha_1)}{v_1} = \frac{\sin(\alpha_2)}{v_2}. \quad (4.9)$$

Známější formulaci Snellova zákona (viz Obr. 3) získáme prostým nahrazením rychlosti v prostředí v indexem lomu prostředí n pomocí jeho definice

$$n = \frac{c}{v}, \quad (4.10)$$

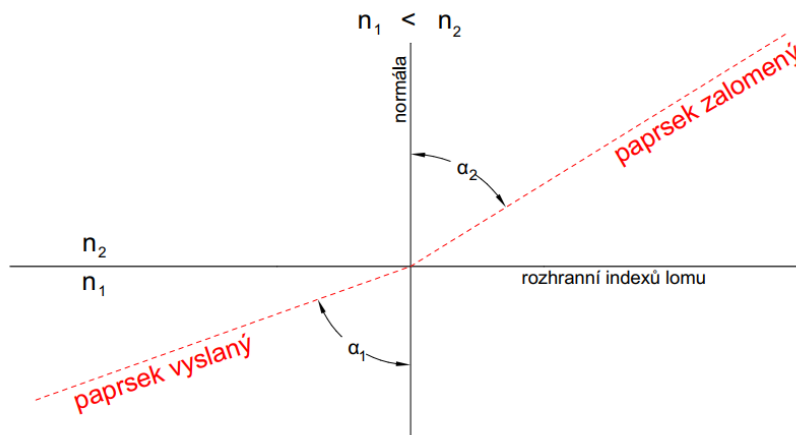
$$\frac{\sin(\alpha_1)}{n_2} = \frac{\sin(\alpha_2)}{n_1}. \quad (4.11)$$



Respektive

$$\sin(\alpha_1) \cdot n_1 = \sin(\alpha_2) \cdot n_2. \quad (4.12)$$

Z výše uvedeného je patrné, že míra vlivu refrakce tedy závisí především na vzdálenosti (páče) a indexu lomu n respektive jeho prostorovém gradientu ∇n . Jelikož při šíření vlnění homogenním prostředím (s konstantním indexem lomu) k lomu nedochází a světlo se šíří po přímce.



Obr. 3 Základní princip Snellova zákona

Dle výše uvedeného obrázku by se mohlo zdát, že vliv refrakce narůstá se vzdáleností lineárně, to ale obecně není pravda. Je třeba uvážit, že index lomu vzduchu je nehomogenní v rámci celé atmosféry (ve všech směrech a v principu ve všech bodech), a tak dochází k lomu dráhy paprsku ve všech jejích bodech. Je tedy nutné uvážit diferenciální tvar Snellova zákona (odvozený níže 7.2.1.3). Proto trend vlivu refrakce není lineárně závislý na vzdálenosti, ale je v principu výrazně rychlejší.

Index lomu vzduchu je možné vypočítat například pomocí Barrel-Searsova vzorce nebo vhodněji jeho modifikací. Pro potřeby výpočtu vlivu refrakce je nutné zavést opravu o vliv teploty a tlaku (případně dalších veličin). Index lomu vzduchu tedy především závisí na vlnové délce paprsku λ , teplotě t , tlaku p a tlaku vodních par e vzduchu. Gradient indexu lomu vzduchu pak můžeme určit jako změnu indexu lomu v závislosti na změně pozice. Podrobněji je toto téma rozpracováno v kapitole 7.1.

Pokud se podíváme na formulaci Fermatova principu (4.3) z jiného pohledu, tak je možné z něj odvodit ještě jeden významný vztah, který použijeme v dalších kapitolách, paprskovou rovnicí také označovanou jako DRPV (viz kapitola 7.2.1.4).

Pokud optickou dráhu uvedenou v rovnici (4.3) parametrizujeme pomocí τ tak, že výchozí bod A odpovídá $\tau = 0$ a koncový bod dráhy B $\tau = 1$, pak bude platit, že

$$ds = \sqrt{\dot{X}^2 + \dot{Y}^2 + \dot{Z}^2} d\tau, \quad (4.13)$$

kde \dot{X} , \dot{Y} a \dot{Z} jsou derivace souřadnic podle τ . Původní vztah (4.3) můžeme zapsat jako



$$L_{A,B} = \int_0^1 n(X, Y, Z) \cdot \sqrt{\dot{X}^2 + \dot{Y}^2 + \dot{Z}^2} d\tau. \quad (4.14)$$

Výše uvedený vztah $L_{A,B}$ je vlastně funkcionálem tzv. Lagrangeovy funkce

$$F = F(X, Y, Z, \dot{X}, \dot{Y}, \dot{Z}) = n(X, Y, Z) \cdot \sqrt{\dot{X}^2 + \dot{Y}^2 + \dot{Z}^2}. \quad (4.15)$$

Pro nalezení extremály funkcionálu $L_{A,B}$ (realizované trajektorie paprsku) slouží diferenciální Eulerova–Lagrangeova rovnice. Tu můžeme v našem případě zapsat pro x jako

$$\frac{\partial F}{\partial X} = \frac{d}{d\tau} \cdot \frac{\partial F}{\partial \dot{X}}. \quad (4.16)$$

Dosazením do naší funkce F získáme vztah pro X

$$\frac{\partial n}{\partial X} \cdot \sqrt{\dot{X}^2 + \dot{Y}^2 + \dot{Z}^2} = \frac{d}{d\tau} \cdot \left(\frac{n \cdot \dot{X}}{\sqrt{\dot{X}^2 + \dot{Y}^2 + \dot{Z}^2}} \right). \quad (4.17)$$

Po dosazení rovnosti ze vztahu (4.13) můžeme rovnici přepsat do tvaru

$$\frac{\partial n}{\partial X} \cdot \frac{ds}{d\tau} = \frac{ds}{d\tau} \cdot \frac{d}{ds} \cdot \left(n \cdot \dot{X} \cdot \frac{d\tau}{ds} \right). \quad (4.18)$$

Což po derivaci složené funkce vede na rovnici

$$\frac{\partial n}{\partial X} = \frac{d}{ds} \cdot \left(n \cdot \frac{dX}{ds} \right). \quad (4.19)$$

Stejným způsobem lze odvodit rovnice pro y a z . Tyto vztahy můžeme následně zapsat ve tvaru jediné vektorové rovnice

$$\nabla n = \frac{d}{ds} \cdot \left(n \cdot \frac{dr}{ds} \right), \quad (4.20)$$

kde dr je polohový vektor a ∇n je gradient indexu lomu ve směrech jednotlivých os. Tento zápis je základní formulací paprskové rovnice (7.2.1.4). Tento vztah je možné také odvodit z Maxwellových rovnic anebo z Eikonálové rovnice.

Nicméně pro použité výpočty v následujících kapitolách je použit mírně upravený vztah vhodnější pro iterativní výpočet dráhy. Ten lze získat dle [32] přidáním proměnné t , která je dalším parametrem křivky a následnou substitucí

$$ds = n \cdot dt. \quad (4.21)$$

Výsledný vztah má tvar



$$\frac{d^2r}{dt^2} = n(r) \cdot \nabla n(r) = f(r), \quad (4.22)$$

přičemž jeho význam je následně popsán v příslušné kapitole 7.2.1.4.

4.2 Refrakce z pohledu geodeta

Jelikož se v geodézii provádí měření v terénu (zpravidla volném prostoru, kde nedochází k řízené stabilizaci atmosféry), tak je logické, že veškeré záměry probíhají v obecně nehomogenním prostředí s proměnným indexem lomu. To platí samozřejmě i pro měření v interiéru, kde sice dochází k cílenému ovlivňování atmosféry (vytápění, klimatizace, větrání...), ale homogenní prostředí zde také obecně nenastává a dochází zde spíše k proudění. V případě uzavřených místností je možné o jisté míře homogenizace atmosféry uvažovat, ale ani tak nejsou tyto podmínky zpravidla stabilní a dostačující. Výjimkou by mohlo být měření v uzavřených soustavách, kde by se například uměle snížil tlak vzduchu a byly omezeny změny teploty, jak tomu může být v případě vědeckých laboratoří.

Pro klasické měření tedy platí, že se změna indexu lomu média projeví zakřivením dráhy procházejícího paprsku, a to v geodetických aplikacích zapříčiní vznik úhlové chyby. Paprsek vstupující do optiky geodetického přístroje vchází pod jiným úhlem, než pod kterým byl vyslán nebo odražen. V případě viditelného světla to prakticky znamená posun či deformaci obrazu ve všech směrech.

Nositelům informace o vlivu refrakce na záření je index lomu, respektive jeho gradient, jak již bylo uvedeno výše. Samotný gradient pak u geodetické pozemní refrakce závisí především na teplotě (jejím gradientu), který prakticky nabývá vyšších hodnot než gradient tlaku či vlhkosti. Otázka určování míry refrakce případně potlačování jejího vlivu tedy přímo souvisí se schopností měřit teploty v zaměřovaném prostoru. Teplotní gradient se v přízemní úrovni atmosféry navíc projevuje především ve vertikálním směru, kde může dosahovat hodnot v rámci jednotek stupňů na metr. Z toho vyplývá, že v geodetických aplikacích jsou zatíženy zejména zenitové úhly, které jsou měřeny ve vertikální rovině (případně určování výšek a převýšení).

Atmosférickou refrakci z pohledu geodézie rozlišujeme na dva druhy závislé na pozici měřícího přístroje a cíle. Refrakce pozemní (geodetická) je charakterizována jako vliv přízemní části atmosféry na měření úhlů, přičemž jsou jak přístroj, tak cíle umístěné na Zemi. Zenitové úhly jsou blízké 100 gon a vzdálenosti zpravidla v řádu desítek až stovek metrů. Refrakce astronomická naopak nastává při měření na nebeské cíle, kdy jsou zenitové úhly blízké 0 gon a záměry v řádu kilometrů a více. U obou těchto variant refrakce negativně ovlivňuje měření. V rámci této práce bude řešen vliv refrakce na data získaná v přízemní úrovni atmosféry v rámci měření inženýrské geodézie – pozemní refrakce.

Z hlediska vlivu na měřená data můžeme ještě refrakci rozdělit na vertikální a horizontální. Vertikální refrakce ovlivňuje především zenitové úhly (a převýšení), horizontální refrakce pak vodorovné směry.

Pro úplnost je ještě vhodné doplnit, že geodetická refrakce má prakticky dvě složky. První složkou je stabilní část refrakce, která je v daném malém rozsahu území stejná a je definována okolím (terénem, porostem, ...) a denní dobou. Její trend



se vyvíjí pomalu a prakticky závisí na slunci (denní doba, oblačnost). Druhá složka by se dala označit jako náhodná a její velikost kolísá v krátkých intervalech v závislosti na aktuálním stavu atmosféry. Její vliv je stejně tak náhodný a je složité jej předpovídat, jelikož je prakticky součtem velkého množství velmi malých vlivů (vítr, proudění, stíny, turbulentní pohyby atmosféry, ...).

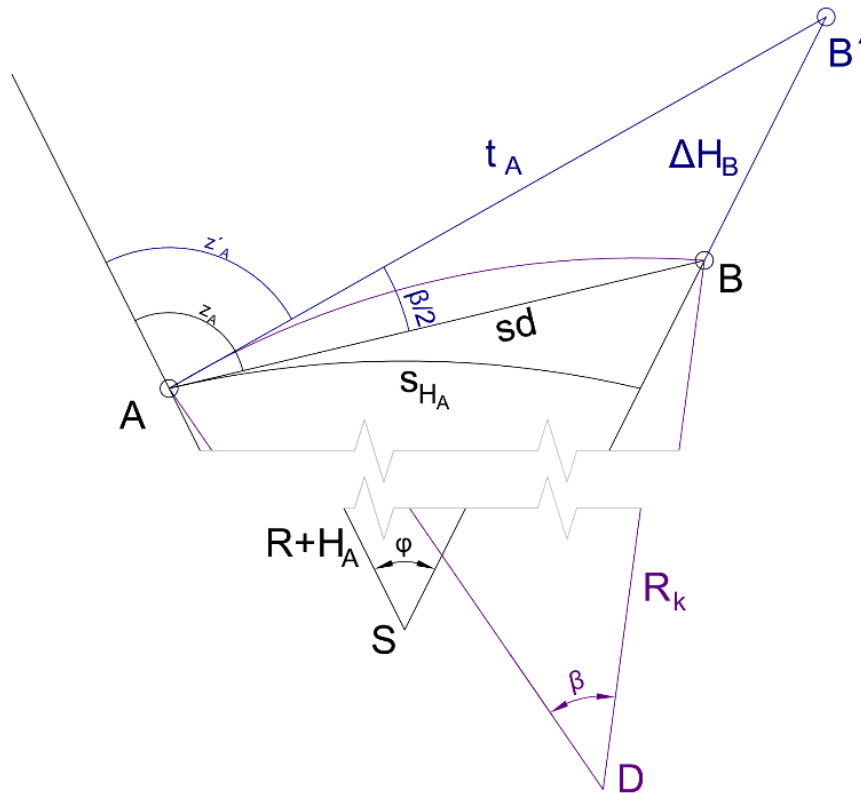
Obecně nelze říci, který z vlivů je výraznější, nicméně náhodná složka způsobuje to, co vnímáme jako vibraci (vlnění) obrazu, zatímco stabilní složka obraz prakticky posouvá. Lze předpokládat, že pokud bude možné refrakci potlačit, tak půjde zejména o její stabilní složku.

4.2.1 Vertikální refrakce

Vertikální refrakce je část refrakce působící v geodézii na měřené zenitové úhly (převýšení) a je prakticky definována vertikálním gradientem indexu lomu.

Pro geodetická měření platí zjednodušené vztahy mezi veličinami dle následujícího obrázku Obr. 4. Mezi body A a B je vyznačena šikmá délka sd a zenitový úhel z_A . Body se nacházejí na zemském tělese (zastoupeném koulí o poloměru R a středu S) ve výšce H_A (respektive H_B). Délka mezi body po kouli S_{HA} ve výšce H_A definuje středový úhel φ .

Dále je zde označen zdánlivý bod B' zdánlivě posunutý o vertikální chybu ΔH_B . Chyba je způsobena odklonem skutečné trajektorie paprsku od přímé spojnice – refrakčním úhlem $\beta/2$ (pokud není refrakční křivkou kružnice, pak je tento úhel obecný ϱ_A), nebo přesněji tečnou t_A k náhradní nebo refrakční křivce (fialově) v bodě A. Refrakční křivka je definována středem křivosti D , poloměrem křivosti R_k a středovým úhlem β , který se také nazývá úhlem úplné refrakce. Zenitový úhel z'_A popisuje hodnotu, kterou reálně naměříme [1].



Obr. 4 Zjednodušené vztahy mezi měřenými a skutečnými veličinami

Z obrázku je možné odvodit některé vztahy. Většina starších autorů uvažuje, že je refrakční křivka blízká kružnici. Pak platí, že jsou si refrakční úhly $\beta/2$ na obou koncích trajektorie rovny

$$\frac{\beta}{2} = \frac{\beta}{2}. \quad (4.23)$$

Dále platí, že součet refrakčních úhlů dává úhel úplné refrakce β

$$\frac{\beta}{2} + \frac{\beta}{2} = \beta. \quad (4.24)$$

Ze znalosti poloměru náhradního tělesa (koule) a některého parametru refrakční kružnice je možné vypočítat v historii často používaný refrakční koeficient k , který prakticky popisuje poměr úhlu úplné refrakce β a středového úhlu φ a přeneseně také poměr poloměru refrakční křivky (kružnice) R_k a poloměru Země s uvažováním nadmořské výšky ($R + H_A$)

$$k = \frac{\beta}{\varphi} = \frac{R+H_A}{R_k}. \quad (4.25)$$

Refrakční koeficient byl uvažován zpravidla jako konstantní veličina, která platí pro dané území a období. Zejména se využíval při měření velkých triangulačních sítí v rámci dané etapy. Bohužel se v minulosti v Čechách nezdědka objevoval nesprávný postoj vůči refrakčnímu koeficientu, a ten byl interpretován jako fixní konstanta



použitelná defacto obecně. Toto v principu chybné použití pramenilo zřejmě z nepochopení základního vlivu refrakce.

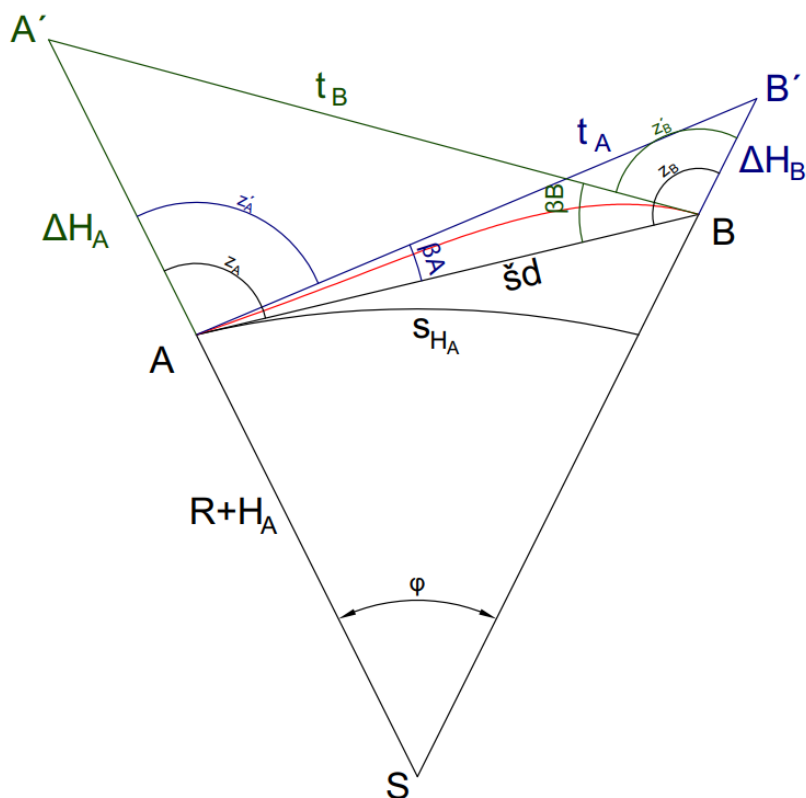
Uvažujeme-li refrakční křivku jako kružnici, pak je možné převést refrakční koeficient na zdánlivý posun způsobený refrakcí ΔH pomocí vztahu, který je v principu stejný jako známý výpočet opravy ze zakřivení Země

$$\Delta H = \frac{-k \cdot s^2}{2 \cdot R}, \quad (4.26)$$

kde s je vodorovná délka. Výsledný ΔH má zde charakter opravy.

Výše popsaný předpoklad, že refrakční křivkou je kružnice, vychází z historické potřeby zjednodušit výpočet refrakčního koeficientu a jeho případné zavedení do výpočtu v rámci vyrovnání sítí. Toto ovšem pouze přibližně platí ve speciálních podmínkách například při měření triangulace ve vyšších polohách. Reálně je ovšem refrakční křivka obecná (především při měření v inženýrské geodézii), a tak skutečnosti více odpovídá Obr. 5, kde je vyznačena obecná refrakční křivka červeně.

Demonstrováný případ je nastíněn pro protisměrné měření zenitových úhlů. Je zde patrné, že oba refrakční úhly β_A a β_B jsou obecné a neplatí pro ně žádný jednoduchý vztah. Z toho plyne, že ani pozice zdánlivých bodů A' a B' nejsou zatíženy stejnou chybou $\Delta H_A \neq \Delta H_B$.



Obr. 5 Vztahy mezi měřeními a skutečnými veličinami

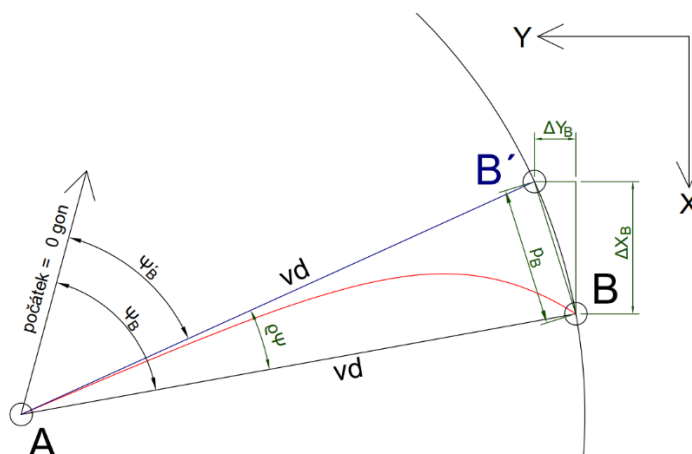


Při použití této úvahy se stává refrakční koeficient méně významným, jak bude dokázáno níže, a jeho použití v inženýrské geodézii nemá velkého významu, proto je třeba použít jiného přístupu k potlačování vlivu refrakce.

4.2.2 Horizontální refrakce

Horizontální refrakce je složkou refrakce projevující se zakřivením dráhy v prostoru vodorovné roviny. Obecně je tedy definována gradientem indexu lomu ve vodorovné rovině (Y, X). Gradient indexu lomu ve vodorovné rovině, jak již bylo uvedeno výše, je za běžných podmínek v přízemní úrovni atmosféry velmi malý a náhodný. Proto je také vliv horizontální refrakce na měřené vodorovné směry (úhly) malý a většinou jej není možné ani měřicky odhalit.

Ukázka vlivu horizontální refrakce na měřené vodorovné směry je vyznačena na Obr. 6. Černě je vyznačena přímá spojnice vd (vodorovná délka) mezi body A a B ve vodorovné rovině a směr na počátek osy vodorovných směrů. Červeně reálná zakřivená trajektorie a modře tečna k ní v bodě A definující zdánlivý bod B' . Zeleně jsou pak vyznačeny chyby v souřadnicích $\Delta Y_B, \Delta X_B$, polohová chyba p_B a chyba měřeného směru ρ_ψ . Teoreticky se měřená délka vlivem zakřivení dráhy zvětšuje, ale prakticky jde o velmi plochou refrakční křivku, takže měřená a reálná délka jsou v rámci přesnosti dnešní geodézie takřka shodné.



Obr. 6 Vliv horizontální refrakce

Nicméně existují speciální případy, kdy je standardní (přírodní) prostorové pole indexu lomu narušeno. Zejména se může jednat o porušení teplotního pole lokálním zdrojem tepla nebo chladu. Příkladem může být měření ve směru rozhraní ploch (vodní plocha, asfalt), kdyby měl být gradient systematický a významný, oproti jeho běžné náhodnosti. Dalším případem, kdy se může projevit vliv horizontální refrakce, může být měření v průmyslových halách poblíž významných zdrojů tepla nebo chladu. Zde jde například o měření v okolí pracujících strojů s výfuky, výhni, rotačních pecí nebo výstupů vzduchotechniky. K extrémním případům patří také měření na hořící objekty. V těchto případech dochází k horizontálnímu sálání tepla v daném směru a tvorbě horizontálního teplotního gradientu. K této otázce jsem se vyslovil ve svém článku [33].



5 Teplota

Jak bylo objasněno v předchozí kapitole, teplota (a její gradient) je vzhledem ke své proměnlivosti stěžejní při otázce určování vlivu přízemní refrakce na geodetická data. Teplota (t) je základní fyzikální veličinou SI a její základní jednotkou je kelvin (K). Teplota popisuje termodynamický stav hmoty a v technických oborech reprezentuje především stav makroskopického systému – tělesa v prostoru. Kelvin je nově definován pomocí Boltzmannovy konstanty (pro potřeby SI $k_B = 1,380\,649 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$) a rovnice převodu teploty na energii (E)

$$t \cdot k_B = E. \quad (5.1)$$

Z rovnice vyplývá, že teplota je v zásadě energie.

Kromě základní jednotky jsou obecně používány i jednotky vedlejší, například stupně Celsia a Fahrenheita. Jejich vztahy jsou uvedeny v tabulce.

Tab. 1 Vedlejší jednotky teploty

Jednotka	Označení	Vztah ke kelvinu	Využití
stupeň Celsia	°C	$K = ^\circ\text{C} + 273,15$	např. v České republice
stupeň Fahrenheita	°F	$K = \frac{5 * (^\circ\text{F} + 459,67)}{9}$	např. v USA

Celsiova stupnice byla definována pomocí dvou stavů vody – teploty tání $= 0 \text{ }^\circ\text{C}$ a teploty varu $= 100 \text{ }^\circ\text{C}$. Jeden kelvin a jeden stupeň Celsia jsou stejně velké, mají pouze posunuté počátky stupnice. Vzhledem k zaměření práce bylo měření i výpočty prováděno primárně v jednotkách stupně Celsia.

Fahrenheitova stupnice byla definována dvěma referenčními body, a to nejnižší dosaženou teplotou při experimentu ($0 \text{ }^\circ\text{F} = -17,78 \text{ }^\circ\text{C}$) a normální lidskou tělesnou teplotou ($98 \text{ }^\circ\text{F} = 36,67 \text{ }^\circ\text{C}$). Později byl tento koncept upraven do „dnešní“ podoby tak, že $32 \text{ }^\circ\text{F}$ odpovídá bodu tání vody a $212 \text{ }^\circ\text{F}$ bodu varu vody.

5.1 Měření teploty

Pro měření teploty se používají teploměry [34], které mohou pracovat na celé řadě fyzikálních principů. V následující kapitole jsou popsány metody určování teploty dilatačními kapalinovými čidly, radiačními teploměry, termočlánky a odporovými čidly a termistory [35]. Kromě těchto metod se dnes ještě používá bimetalových teploměrů, kterými se měří ohyb bimetalového pásku, a plynových teploměrů, kdy se určuje změna objemu plynu.

5.1.1 Dilatační čidla kapalinová

Jedna z nejpoužívanějších metod určování teploty založená na principu teplotní roztažnosti látek. Samotný senzor je zpravidla vyroben z tenké skleněné trubičky, ve které je umístěna látka s vhodnými vlastnostmi (rovnoměrné rozpínání).



Základním principem dilatačních čidel je fyzikální závislost změny objemu kapaliny na změně teploty. V praxi se používají především teploměry rtuťové, alkoholové a pentanové. Měřený rozsah teploty je logicky omezen teplotou tání a bodem varu dané látky (viz Tab. 2).

Pro používané látky v klasických kapalinových teploměrech se obecný vztah závislosti objemu V na změně teploty Δt uvádí v lineárním tvaru dle [36]

$$V = V_0 \cdot (1 + \beta \cdot \Delta t), \quad (5.2)$$

kde V_0 je výchozí objem při teplotě T_0 , β je v tomto případě součinitel objemové roztažnosti kapalin při teplotě t_0 a Δt je změna teploty oproti teplotě t_0 . V případě potřeby vyšší přesnosti se pro výpočet uvažuje vztah kvadratický.

Tab. 2 Základní charakteristiky látek v kapalinových teploměrech

Kapalina	Teplota [°C]		Součinitel β pro 20 °C [10 ⁻³ K ⁻¹]
	tání	varu	
Ethanol	-114,4	78,3	1,100
Rtuť	-38,8	356,7	0,207

Pro přesnost analogových kapalinových teploměrů se uvádí klasický vztah 0,5 velikosti nejmenšího rozeznatelného dílku stupnice. To v praxi znamená, že nejvíce závisí na šířce kapiláry, kterou stoupá kapalina (zjednodušeně lze říci, že čím užší, tím přesnější).

Tato metoda nebyla v experimentech užita z důvodu nevhodnosti pro měření plyných látek, relativní náročnosti automatického odečtu, rozměru měřidla a nedostatečné přesnosti v případě klasických teploměrů.

5.1.2 Teploměry radiační (infračervené)

Základním principem této metody měření teploty je fyzikální fakt, že každé těleso s teplotou vyšší než absolutní nula vyzařuje energii. Množství energie roste s teplotou tělesa. V rámci měření teploty se pak měří hodnota vyzařované energie v infračervené části spektra. Druhým faktorem ovlivňujícím množství vyzařené energie je emisivita, která popisuje schopnost vyzařovat energii.

Pro jednodušší běžné bezkontaktní teploměry je tato hodnota nastavena konstantně na cca 0,95 (což zhruba odpovídá emisivitě většiny běžných materiálů). U vyšších tříd je možné tuto hodnotu nastavit. V praxi se to často obchází použitím speciálních nálepek (nebo nátěrem), které vykazují předepsanou emisivitu. Díky tomu lze docílit rozumné přesnosti určování teploty. Ta se obvykle pohybuje v rozmezí 1 °C až 2 °C nebo 1 % až 2 % z měřené teploty. Měrný rozsah je naopak velký a dosahuje rozpětí od -30 °C do řádově tisíců stupňů.

Většina teploměrů je vybavena laserovým zaměřovačem, který přibližně vymezuje oblast měření teploty objektu.

Sféra využití těchto teploměrů je zaměřena především na elektrotechniku, kde umožňuje bezpečné měření teploty na obvodech a případné odhalení závad (přehřátí obvodu). Dále se využívají například ve stavebnictví a potravinářství.



Tato metoda je prakticky použitelná jen u určování teploty pevných těles, a proto není vhodná její aplikace na měření teploty vzduchu. Zároveň není pro danou aplikaci dostatečná ani její přesnost. Naopak by bylo vhodné její využití pro určení teploty konkrétního objektu s následným modelováním jeho teplotního pole. Na základě simulace by bylo možné provést rozvalu nad dosažitelnou přesností geodetického měření (jak je použito například v [37][33]).

5.1.3 Teploměry odporové

Při této metodě se využívá známého fyzikálního principu popisujícího závislost změny odporu vodiče na změně jeho teploty. V tomto případě je tedy použit opačný pohled, kdy se pozoruje změna odporu obvodu a z ní je odvozena změna teploty na základě kalibrace. Nejčastějšími materiály pro výrobu čidel jsou díky svým fyzikálním vlastnostem platina, měď a nikl. V naší aplikaci byla zvolena čidla platinová, proto následující výpočty budou zaměřeny na tento typ dle zdroje [38].

Odpor R lze vypočítat z polynomického rozvoje

$$R = R_0 \cdot (1 + A \cdot t + B \cdot t^2 + C \cdot t^3 + \dots), \quad (5.3)$$

kde R_0 je konstanta udávající odpor při teplotě 0°C , t je teplota a A, B, C jsou koeficienty polynomu.

Pro menší rozsah 0°C až 100°C se běžně používá zjednodušený tvar vzorce dle [38]:

$$R = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot t), \quad (5.4)$$

kde α je teplotní koeficient odporu a nabývá pro platinu hodnoty $\alpha = 0,385 \cdot 10^{-2} \text{K}^{-1}$ až $0,391 \cdot 10^{-2} \text{K}^{-1}$.

V praxi se pro přesnější práci využívá odvozených polynomů z (5.3) pro dva intervaly rozdělené 0°C . Pro interval teploty 0°C až 850°C nám vystačí klasický polynom 2. stupně:

$$R = R_0 \cdot (1 + A \cdot t + B \cdot t^2). \quad (5.5)$$

Pro rozsah -200°C až 0°C se používá kubický tvar polynomu popisující výpočet výsledného odporu čidla:

$$R = R_0 \cdot (1 + A \cdot t + B \cdot t^2 + C \cdot t^3). \quad (5.6)$$

Čidla se označují druhem použitého materiálu (Pt, Cu, Ni) a konstantou R_0 . Tedy v experimentech použité čidlo Pt1000 odkazuje na čidlo vyrobené z platiny s odporem 1000Ω při teplotě 0°C . Uvedené koeficienty A, B, C dle normy IEC-751 nabývají pro platinu hodnot $A = 3,9083 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1}$, $B = -5,775 \cdot 10^{-7} \text{K}^{-2}$, $C = -4,183 \cdot 10^{-12} \text{K}^{-4}$.

Výsledný vztah pro výpočet teploty získáme úpravou rovnic (5.5) a (5.6), pokud pro řešení kvadratické či kubické rovnice známe měřený aktuální odpor R :



$$0 = R_0 \cdot B \cdot t^2 + R_0 \cdot A \cdot t + R_0 - R, \quad (5.7)$$

popřípadě:

$$0 = R_0 \cdot C \cdot t^3 + R_0 \cdot B \cdot t^2 + R_0 \cdot A \cdot t + R_0 - R. \quad (5.8)$$

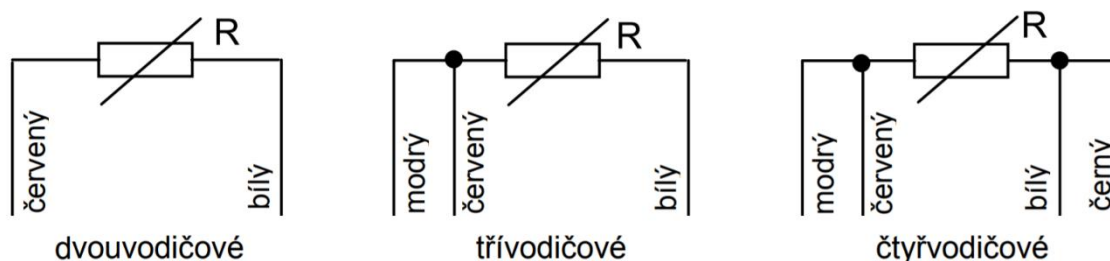
Je důležité připomenout, že zde uvedené konstanty závisí na čistotě určené platiny a konkrétním předpisu či normě. Následující tabulka Tab. 3 prezentuje chyby teplot vypočítané ze vzorců (5.4) a (5.7) oproti referenčnímu výpočtu dle (5.8) pro čidlo typu Pt1000.

Tab. 3 Teoretické chyby výpočtu teploty

Teplota [°C]	Chyba dle (5.4) [°C]	Chyba dle (5.7) [°C]
-200	8,966	-0,008
-100	2,986	-0,001
-50	1,119	0,000
-20	0,358	0,000
-10	0,164	0,000
0	0,000	0,000
10	-0,134	0,000
20	-0,238	0,000
30	-0,311	0,000
40	-0,355	0,000
50	-0,369	0,000
80	-0,230	0,001
150	1,146	0,004
300	9,062	0,032
500	30,186	0,157
850	96,367	0,878

V rámci pokusů uvedených v kapitole 8 tyto výpočty obstarávalo automaticky záznamové zařízení interním softwarem.

Posledním článkem výpočtu měřené teploty je odstranění vlivu odporu způsobeného vodičem. Tento problém vyvstává, pokud jde o dvou vodičové zapojení čidla (viz Obr. 7), vyšší formy zapojení (třívodičové a čtyřvodičové) tento jev účinně odstraňují.



Obr. 7 Schéma zapojení odporového čidla [39]



V našem případě jsou čidla zapojena dvou vodičově, a tak je třeba vypočítat chybu způsobenou odporem vodiče. K tomuto účelu nám poslouží veličina rezistivita ρ , která popisuje vodivostní a odporové vlastnosti látek vedoucích elektrický proud. Pro rezistivitu homogenního vodiče stálého průřezu platí vztah

$$\rho = \frac{R \cdot S}{l}, \quad (5.9)$$

kde R je odpor vodiče, S obsah kolmého řezu a l je délka vodiče (celá). Jednoduchou úpravou získáme vztah pro odpor

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S}. \quad (5.10)$$

Výsledná oprava se získá prostým dosazením do předchozího vztahu pro výpočet teploty z odporu (5.8). Použijeme-li parametry z naší konkrétní aplikace uvedené v Tab. 4, získáme hodnoty chyb teplot ΔT na jeden metr délky kabelu. Pro výpočet je nutné uvažovat délku kabelu l dvojnásobně dlouhou, to je způsobeno vedením kabelu k čidlu a zpět. Pro výpočet byla uvažována hodnota rezistivity mědi $\rho = 1,785 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ (odpovídá cca 25 °C).

Tab. 4 Vliv délky kabelu na výslednou teplotu [39]

Varianta	S [mm ²]	R [Ω]	Δt [°C / m]
Zapouzdřený (6.1.1.1)	0,34	0,105	0,027
Zalitý (6.1.1.2)	0,22	0,162	0,042

V rámci práce byly použity dva druhy technického provedení senzorů. Jsou to senzory zapouzdřené (kapitola 6.1.1.1) a zalité (kapitola 6.1.1.2). Pro obě provedení dle [38] platí mezní chyba Δt pro platinová čidla tř. A a tedy:

$$\Delta t = (0,15 + 0,002 \cdot |t|), \quad (5.11)$$

kde $|t|$ je teplota v absolutní hodnotě. Výsledné mezní chyby pro různé třídy a teploty jsou zapsány v Tab. 5.

Tab. 5 Přesnost odporových čidel

Teplota T [°C]	Třída AA	Třída A	Třída B	Třída C
	Δt [°C]			
-50	-	-	0,55	1,10
-30	-	0,21	0,45	0,90
0	0,10	0,15	0,30	0,60
25	0,14	0,20	0,43	0,85
100	0,27	0,35	0,80	1,60
150	0,36	0,45	1,05	2,10
200	-	0,55	1,30	2,60
300	-	0,75	1,80	3,60
400	-	-	2,30	4,60
500	-	-	2,80	5,60
600	-	-	-	6,60

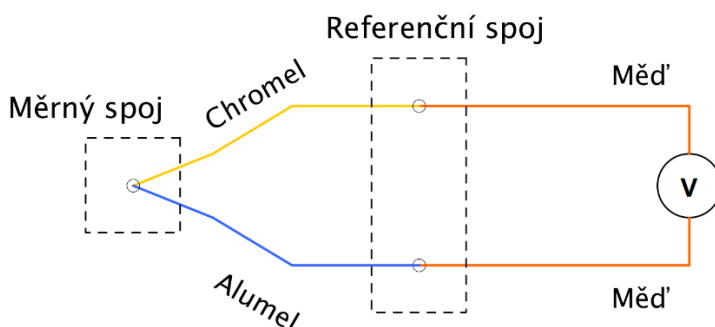


5.1.4 Termoelektrický teploměr (termočlánek)

Fyzikálně se drátková čidla (termočláanky) opírají o Seebeckův jev (také termoelektrický jev)[40][41], který popisuje přímou proměnu teplotních rozdílů na elektrické napětí a obráceně.

Čidlo samo o sobě je tvořeno dvojicí izolovaných vodičů z různých kovů, které jsou v místech odečtu teploty spojeny. Na druhém konci jsou opatřeny jednoduchým systémem pro zapojení do loggeru. Existuje velké množství dvojic termočláankových kovů (typů termočláanků), které se označují písmeny. U experimentů byly použity čidla typu *K*, která jsou tvořena vodiči ze slitiny chromu a niklu (kladný pól) a hliníku a niklu (záporný pól).

Vznik elektrického napětí se uskuteční, pokud je dvojice rozdílných kovů (či polovodičů) spojena do uzavřeného obvodu a pokud mezi spoji existuje tepelný gradient. Toho se v praxi dociluje tak, že jeden spoj je nastaven a ustálen na konkrétní teplotu (referenční spoj) a druhý slouží jako měřicí čidlo (zobrazeno pro typ *K* na Obr. 8).



Obr. 8 Schéma termočlánek typu *K*

Obecný vztah pro výpočet termoelektrického napětí U pak lze vyjádřit integrálem

$$U = \int_{t_1}^{t_2} (S_B(T) - S_A(T)) \cdot dt, \quad (5.12)$$

kde S_A , S_B jsou Seebeckovy koeficienty materiálů A a B závislé na teplotě t a dt je diferenciální změna teploty. V případě, že jsou koeficienty v měřeném teplotním rozsahu přibližně konstantní, což je pro používané materiály typické, lze použít lineární zjednodušení vzorce

$$U = (S_B - S_A) \cdot (t_2 - t_1), \quad (5.13)$$

kde t_1, t_2 jsou teploty určené na spojích. t_1 určená na ustáleném spoji (studeném referenčním spoji) a t_2 měrném spoji (čidle). Vzorec (5.13) jde také vyjádřit pomocí Seebeckova součinitele $\alpha_{1,2}$, který je spočítán pro konkrétní technické řešení (písmenné označení článku) [38]



$$U = \alpha_{1,2} \cdot (t_2 - t_1). \quad (5.14)$$

Pro přesnější výpočty je nutné použít složitější rozvoj

$$U = \sum_{i=0}^n a_i \cdot t, \quad (5.15)$$

kde a_i jsou experimentálně určené koeficienty pro dané čidlo a t je teplota na měrném spoji.

Pro čidlo typu K , které bylo použito, je navíc zaveden modifikovaný vztah v rozsahu od 0 °C do 1300 °C dle [38][42]

$$U = \sum_{i=0}^n a_i \cdot t + c_0 \cdot \exp(c_1 \cdot (t - 126,9686)^2), \quad (5.16)$$

zde navíc výpočet obsahuje konstanty c_0 , c_1 .

V následující tabulce Tab. 6 jsou uvedeny použité konstanty pro čidlo typu K . Pro ostatní typy jsou koeficienty uvedeny v [38].

Tab. 6 Koeficienty pro výpočet teploty – termočlánek typu K [38]

Koeficienty [$\mu\text{V K}^{-n}$]		
Koef. n	-270 °C až 0 °C	0 °C až 1372 °C
a_0	0,0000000000E+00	-1,7600413686E+01
a_1	3,9450128025E+01	3,8921204975E+01
a_2	2,3622373598E-02	1,8558770032E-02
a_3	-3,2858906784E-04	-9,9457592874E-05
a_4	-4,9904828777E-06	3,1840945719E-07
a_5	-6,7509059173E-08	-5,6072844889E-10
a_6	-5,7410327428E-10	-3,1088872894E-12
a_7	-3,1088872894E-12	-1,0451609365E-14
a_8	-1,0451609365E-14	-1,9889266878E-17
a_9	-1,9889266878E-17	-1,6322697486E-20
a_{10}	-1,6322697486E-20	-
c_0	-	1,1859760000E+02
c_1	-	-1,1834320000E-04

5.2 Obtíže při měření teploty vzduchu

Samotné měření teploty je v dnešní době relativně jednoduchou procedurou, při které není prostor pro výrazné měřické chyby. Nicméně je zde velká škála vnějších vlivů, které výrazně komplikují možnost měřit přesně a věrohodně teplotu atmosféry. V první řadě jde o skupinu vlivů, které způsobí, že měřená teplota nebude odpovídat teplotě vzduchu, ale bude ovlivněna okolím.



Nejvýraznějším problémem je samozřejmě to, že čidla měří prakticky svou vlastní teplotu a nikoli teplotu okolního média. To znamená, že pokud je atmosféra výrazně proměnná, pak čidlo nemusí stihnout zaregistrovat krátkodobou změnu, nebo reaguje s logickým zpožděním. Tento vliv je nutné minimalizovat volbou vhodného teplotního čidla, které bude vykazovat vysokou míru rychlosti odezvy.

Dalším problémem ze stejné skupiny je to, že čidlo se může snadno zahřívát, pokud je exponováno slunečnímu záření. Teplota čidla může být vyšší i o desítky stupňů, pokud je umístěno na přímém slunci oproti teplotě okolního vzduchu. Praktickým řešením je tedy umístění čidla do stínu. Ten je možné uměle vytvořit stínící konstrukcí, která zamezí přímému slunečnímu svitu a pokud možno zamezí také vlivu odraženého světla.

Použití stínící konstrukce ovšem souvisí s další obtíží. Jakákoli tělesa v okolí čidla mohou stejně tak ovlivňovat teplotu blízkého okolí, a tak dojde k zatížení výsledné skutečné teploty vzduchu chybou. Prakticky dojde k tomu, že určená teplota je v daném místě měření správná, ale nesprávně reprezentuje teplotu v okolí. To samozřejmě souvisí opět se zahříváním objektů při exponování slunečnímu svitu nebo v případě, že těleso samo o sobě vydává teplo (v případě pracujících strojů, výstupů vzduchotechniky nebo úmyslně horkých či chladných objektů). Potlačení tohoto vlivu jde realizovat prostou vhodnou volbou místa měření, kdy budou čidla v dostatečné vzdálenosti od objektů ovlivňujících měření. V případě použití stínící konstrukce je to složitější, jelikož pro praktické použití musí být konstrukce v relativní blízkosti čidel a je vhodné ji zároveň použít i jako nosnou. Je tedy nutné zvolit konstrukci takovou, aby sice aktivně a účinně stínila slunečnímu záření, ale zároveň svým vlastním teplotním polem co nejméně ovlivňovala přirozené teplotní pole vzduchu. V našem pojetí byla zvolena masivní konstrukce ze dřeva, ke které byla teplotní čidla připevněna v minimální vzdálenosti 4 cm od jejího těla.

Dalším aspektem je samotný tvar konstrukce. Pro delší měření je vhodné sestavit konstrukci, která bude umožňovat její statické umístění po celou dobu měření – nebude nutné ji natáčet. Ovšem zcela uzavřená konstrukce by jistě nebyla vhodná, jelikož by zamezila proudění vzduchu, a dokonce by mohla fungovat i jako skleník, kdyby se teplota uvnitř začala při slunečním záření zvyšovat neúměrně vnějšímu okolí. Jako kompromisní řešení byla v následujících experimentech zvolena svislá konstrukce tvaru písmene L shora opatřená stříškou. Navíc pro docílení lepšího proudění vzduchu byly do konstrukce vyvrtány otvory. Samotná konstrukce je detailně popsána v kapitole 6.2.

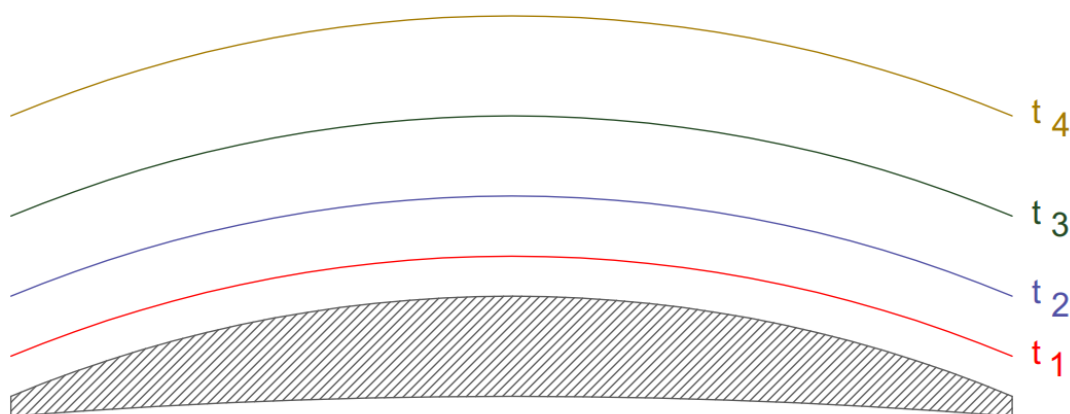
Významným bodem k úvaze je také časový interval měření teploty. Teplota se za běžných podmínek v čase vyvíjí, proto je pro potřeby geodézie nutné určovat teplotu v okamžiku měření. Toho lze buď docílit synchronizací měřících pomůcek, což může být vzhledem k firemnímu softwaru poněkud složité, nebo kontinuálním (nebo intervalovým) měřením teploty s následným interpolačním výpočtem v konkrétním okamžiku geodetického měření.

Pokud bychom se zaměřili na další problémy související s měřením vertikálního teplotního gradientu, tak za zmínku dále stojí nutnost svislé konstrukce se stejnými omezeními, která platí u stínící konstrukce, vysoká přesnost odečtu teplot ve stejný okamžik a vhodná volba výškového rozestupu teplotních čidel pro výpočet gradientu.



Ze zákona hromadění směrodatných odchylek je zřejmé, že přesnost vertikálního gradientu roste s přesností určování teploty a s velikostí rozestupu mezi čidly. Nicméně tato matematická operace nám nic neříká o praktické věrohodnosti výsledného čísla, ale jen o jeho statistické pravděpodobnosti. Je tedy nutné čidla umístit do výšek, které vhodně reprezentují přízemní vertikální teplotní gradient. Toto není snadné splnit, jelikož atmosféra a zejména její přízemní část se neřídí žádnými striktními pravidly a je velmi proměnná. Je možné obejít tuto potíž tím, že se použije více čidel rozmístěných tak, aby odpovídala konkrétnímu měření.

Pokud myšlenku měření teploty atmosféry dále rozšíříme do prostoru, pak se vše komplikuje horizontálním teplotním gradientem. Ten je sice oproti vertikálnímu přízemnímu teplotnímu gradientu malý, ale je potřeba jej uvažovat. Správnou, ale prakticky složitou cestou, by bylo osadit v měřeném území množství konstrukcí s čidly a následně interpolovat teplotu v požadovaném bodě z měření okolních čidel. To ovšem v praktické geodézii není snadno proveditelné. Proto je vhodné zavést alespoň základní předpoklad o rozvrstvení přízemní úrovně atmosféry, který je schematicky zobrazen na obrázku Obr. 9.



Obr. 9 Předpoklad rozvrstvení teploty v přízemní úrovni atmosféry

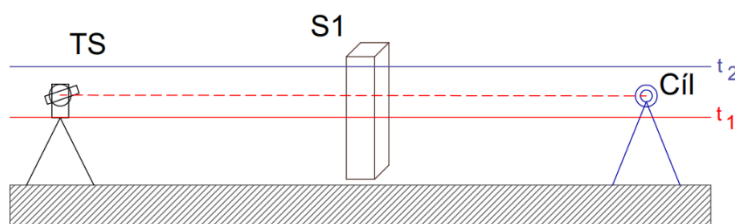
Teploty v přízemní úrovni atmosféry nejsou obecně srovnány od největší k nejmenší či naopak, ale jsou dány také intenzitou vyzařování tepla povrchem v daném místě. Nicméně lze předpokládat, že se teplota v přízemní úrovni atmosféry rozvrství přibližně ekvidistantně vůči povrchu. Díky tomuto předpokladu je možné použít menší počet čidel pro podchycení teplotního gradientu v ploše.

5.3 Návrh metody měření teploty a teplotního gradientu

Na základě výše uvedeného byla navržena metoda pro potlačení vlivu refrakce na měření zenitových úhlů. V nejjednodušší variantě jde o zařazení současného měření teploty (teplotního gradientu) během měření zenitového úhlu a následný výpočet DRPV (kapitola 7.2.1.4) se zavedením oprav. Prakticky je nutno dodržet základní principy zaručující měření teploty vzduchu se zamezením negativního ovlivnění způsobeného vlivem okolních objektů nebo vlivem zahřívání čidel přímým slunečním zářením – použít vhodnou nosnou a stínící konstrukci. Samotná konstrukce však nesmí mít významný vliv na měřená teplotní data (nesmí ovlivňovat měření).



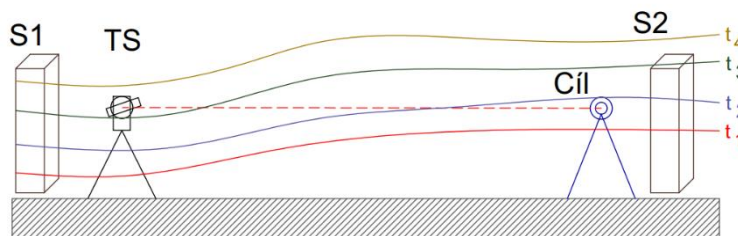
Nejjednodušší modelový případ můžeme popsat tak, že je měřeno na relativně krátkou vzdálenost (cca do 50 m) a prostředí v okolí měření je homogenní. Homogenitou prostředí je zde myšleno zejména to, že celá dráha paprsku probíhá nad stejným terénem, definovaným stejným povrchem a přibližně ve stejné výšce nad ním. V takovém idealizovaném případě (viz obrázek Obr. 10) by bylo možné předpokládat, že vertikální teplotní gradient bude nabývat stejné velikosti po celé měřené trajektorii. Logicky by tedy postačilo měřit vertikální teplotní gradient jen na jednom místě (ideálně uprostřed trajektorie) a pouze dvojicí čidel umístěných tak, aby pokrývala rozsah, ve kterém se nad terénem realizuje dráha paprsku. Takto určený gradient by byl teoreticky konstantní pro celou dráhu a následný výpočet DRPV (či jiná verze) by mohl být realizován s gradientem jako konstantou.



Obr. 10 Schéma pro konstantní gradient

Nicméně v praxi není takto idealizované prostředí obvyklé a gradient ovlivňují i další parametry jako například zastínění části dráhy okolní vegetací a zástavbou nebo výrazné změny terénu ve smyslu různých materiálů povrchu a změny výšky nad terénem. Proto je vhodné použít spíše následující postup, který vliv těchto faktorů může výrazně snížit.

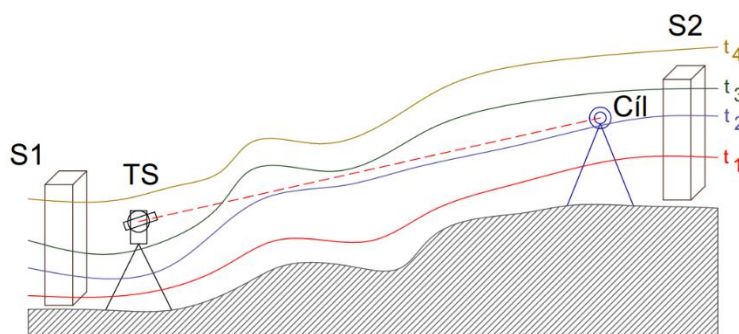
Prakticky je tedy vhodné použít minimálně dvě měřicí soustavy teplotních čidel k určování vertikálního teplotního gradientu, a to na začátku (u totální stanice) a na konci trajektorie (u cíle) (obrázek Obr. 11). Výsledný gradient je pak pro každý bod dráhy počítán lineární interpolací mezi dvojicí nejbližších měřicích soustav. To nám umožní měřit na větší vzdálenost, kde je vertikální teplotní gradient ovlivněn i horizontální složkou a změnami způsobenými například zastíněním části dráhy nebo okolními objekty. Obecně tedy platí, že větším množstvím použitých měřicích soustav pro určování teplotního gradientu lze získat přesnější model teplotního rozdělení atmosféry, a tím přesnější výsledky. Autoři v mnoha případech uvažují, že na krátkých délkách (do 200 m) postačí použít dvě až tři soustavy, a tím homogenní terén vhodně definovat. Toto je předpoklad, který bude dále ověřován.



Obr. 11 Schéma pro proměnný gradient

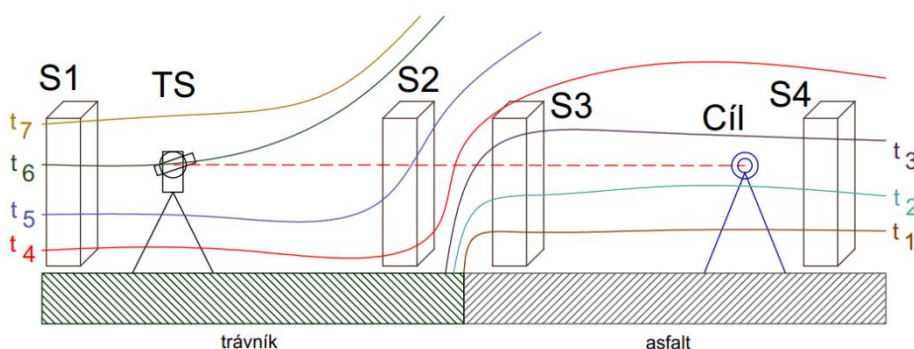


V případě, že je terén výškově členitý a výška dráhy paprsku nad terénem je tedy proměnná (obrázek Obr. 12), by bylo vhodnější použít více než dvě čidla (například 4) na měřicí soustavě v různých výškách, a tak získat více gradientů pro různé výšky nad terénem. Pro správné výsledky je potřeba použít výškový model terénu v okolí trajektorie (zde zřejmě postačí centimetrová přesnost) a následný výpočet teplotního gradientu v bodě dráhy upravit tak, aby zohledňoval tyto změny. Toho lze docílit například tak, že se pro bod dráhy určí výška nad terénem a pro každou ze dvou nejbližších měřicích souprav se interpoluje gradient v dané výšce. Následně se použije lineární interpolace v závislosti na vzdálenosti od obou soustav, jak bylo řečeno výše.



Obr. 12 Schéma pro proměnný gradient nad nerovným terénem

Nejsložitější případ obecně nastane, pokud je okolí měření členité i v rámci použitého materiálu povrchu (například střídající se travnatá plocha a asfalt nebo dlažba, obrázek Obr. 13), jelikož vertikální teplotní gradient v přízemní úrovni atmosféry velmi ovlivňuje sálání povrchu. V takovém případě (zejména pokud jde o slunný den) je potřeba uvážit, zda určit teplotní gradient pro každý povrch zvlášť pomocí vlastní měřicí soupravy. Ve speciálních případech se nabízí i možnost měřit teplotní gradient vždy před a po změně povrchu terénu. V obou případech je pak následně potřeba ve výpočtu zohlednit délku trajektorie, kterou paprsek nad daným terénem urazí.



Obr. 13 Schéma pro proměnný gradient nad různým povrchem

Zde je ovšem třeba připomenout, že výše uvedené postupy vycházejí ze základní myšlenky, že je možné relativně nízkým počtem čidel věrohodně popsat teplotní pole v oblasti měření. To znamená, že je splněn výchozí předpoklad teplotní stratifikace atmosféry a systematického teplotního gradientu v oblasti. Tyto předpoklady budou dále ověřovány v experimentech v kapitole 8.



6 Použitá aparatura pro měření teploty

Pro měření teploty jsou stěžejním prvkem použita teplotní čidla, konkrétně jejich přesnost v teplotním intervalu, při kterém se geodetické měření provádí. Druhy použitých čidel, jejich výhody a nevýhody jsou blíže popsány v předchozí kapitole 5.1.

Druhým stěžejním prvkem při určování teploty ovzduší je schopnost minimalizovat tepelný vliv dalších objektů na čidla. Samotný vzduch je poměrně dobrý tepelný izolant, proto téměř jakýkoliv dotek čidla s jiným médiem (předmětem) negativně ovlivňuje výsledné pozorování.

Dalším aspektem, který je nutno řešit, je přímý osvit čidla slunečním zářením, které se tak může snadno zahřát až na 60 °C, což je samozřejmě o desítky stupňů více, než je reálná teplota okolního ovzduší.

Z tohoto důvodu je zřejmé, že čidla musejí být umístěna ve stínu a v prostoru, který neumožňuje významné tepelné sálání blízkých objektů. Na druhou stranu by bylo nevhodné vložit čidla do uzavřeného boxu z důvodu praktického zamezení proudění vzduchu, a tedy i drobných tepelných výkyvů, které mají být jedním z pozorovaných jevů. Také by mohl v částečně uzavřeném prostoru vznikat stav podobný působení skleníku, ve kterém se teplota oproti okolí ustaluje nebo zvyšuje.

Pro tento účel byl navržen jednoduchý zakrývací systém, u něhož se předpokládá mechanické potlačení výše uvedených negativních vlivů a je detailněji popsán v kapitole 6.2.

6.1 Čidla

Následující řádky se zabývají vybranými druhy teplotních čidel, jejich výhodami a nevýhodami pro danou aplikaci. Představení detailního principu jejich fungování je popsáno v kapitole 5.1.

6.1.1 Odporová čidla

Při této metodě se využívá známého fyzikálního principu popisujícího závislost změny odporu vodiče na změně jeho teploty. V tomto případě je tedy použit opačný pohled, kdy se pozoruje změna odporu a z ní je odvozena změna teploty na základě kalibrace.

6.1.1.1 Senzor zapouzdřený TG8-40

Po konzultaci s odborníky z oblasti výroby čidel a měřicích aparatur z firmy SENSIT s.r.o. byly zakoupeny čtyři senzory TG8-40 Pt1000 / 3850 třídy A, které jsou kalibrovány již výrobcem a mají určenou směrodatnou odchylku v daném rozsahu cca 0,13 °C až 0,16 °C (viz Tab. 5, [38]). Součástí balení je výrobcem určený kalibrační list. K sensorům bylo nutné pořídit nové záznamové zařízení (více v 6.3). Bohužel výrobce nedisponuje loggerem, který by umožňoval měření s automatickým zaváděním opravy z odporu vodiče tzv. trojvodičové zapojení (viz kapitola 5.1.3).

Senzor TG8-40 je vybaven platinovým čidlem Pt1000 / 3850 třídy A v pouzdru z nerezové oceli, přívodním kabelem v ochranném izolačním obalu ze silikonu



a izolovaným přípojovacím konektorem do loggeru. Samotné válcové pouzdro je velké 40 mm a je vyobrazeno na Obr. 14.



Obr. 14 Zapouzdřený senzor TG8-40

Tento senzor přesností odpovídá požadavkům, ale při prvních experimentech bylo odhaleno, že nedostačuje rychlost odezvy na změnu teploty. Problémem je ochranné zapouzdření, které nedovoluje proudění média (vzduchu) v těsné blízkosti čidla.

Další parametry senzoru, jako je měřicí proud, způsob zapojení a odolnosti jsou popsány v Návodu k použití [39].

6.1.1.2 Senzor zalitý TR097C

Vzhledem k nedostatkům zapouzdřených čidel byl vybrán po konzultaci senzor TR097C vybavený stejným čidlem (Pt1000 / 3850 třídy A, [43]). Hlavním rozdílem je absence ocelového ochranného pouzdra. Čidlo v provedení TR097C je pouze zalito v laku pro zvýšení fyzické odolnosti (viz Obr. 15). Rychlost odezvy takového čidla je výrazně vyšší a jeví se dostačující pro uskutečněné experimenty. Jedinou nevýhodou tohoto senzoru je menší fyzická odolnost a odolnost vůči vlhkosti a dalším povětrnostním vlivům. Přívodní kabel je řešen obdobně, avšak postrádá stínění a obsahuje pouze tepelnou izolaci. Rozdíl je také v průměru vodiče, a proto i konstantě opravy z délky kabelu, což je popsáno v Tab. 4.



Obr. 15 Zalitý senzor TR097C

6.1.2 Čidla drátková – termočlánky

Termočlánky fungují na základě Seebeckova jevu (také termoelektrický jev) [40] a [41], který popisuje přímou proměnu teplotních rozdílů na elektrické napětí a obráceně. První testy a pokusy (dále v kapitole 8.1) byly prováděny se sadou dvanácti drátkových čidel. Konkrétně se jednalo o termočlánek typu K (Cr-Al) třídy A s měrným



rozsahem od $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $260\text{ }^{\circ}\text{C}$, kterým již katedra disponovala. Pro ukládání dat bylo využito registračního zařízení s 12 vstupy pro tato čidla. Výrobce v této kombinaci udává přesnost čidel v odhadovaném měřeném rozsahu cca $1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Jelikož je předmětem našeho zájmu především určení relativních teplot – rozdílů teplot (popřípadě vertikální gradient), je možné provést jednoduchou kalibraci čidel pro zvýšení jejich relativní přesnosti.

V následující tabulce Tab. 7 jsou prezentovány základní charakteristiky tří tříd teplotního čidla typu *K* dle [38].

Tab. 7 Přesnost a měrný rozsah čidel typu *K*

	1. třída	2. třída	3. třída
Min [$^{\circ}\text{C}$]	-40	-40	-200
Max [$^{\circ}\text{C}$]	1000	1200	40
Přesnost [$^{\circ}\text{C}$]	1,5	2,5	2,5

Nicméně následné experimenty ukázaly (dále v kapitole 8.1), že tato čidla jsou pro daný výzkum nevhodná, protože jejich přesnost je značně kolísavá a celkově nedostačující. Přesnost a samotné kalibrační údaje jsou závislé na konkrétní teplotě a nejspíše také na napnutí drátu a dalších těžko postihnutečných vlivech (indukce). Proto bylo od měření těmito čidly upuštěno.

6.2 Konstrukce

Jak bylo objasněno v kapitole 5.2, je pro měření teploty určité látky (plynu) nutné zamezit ovlivňování teploty čidla jiným tepelným zdrojem. Jelikož je vzduch poměrně kvalitní tepelný izolant, je za chybu měřené teploty zodpovědný téměř jakýkoli dotek čidla s jiným objektem a tomu je třeba prakticky zamezit. Druhým nepříznivým vlivem je přímý osvit čidla sluncem. Za takových okolností se může čidlo zahřát na více jak $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, což je v našich podmínkách pro teplotu vzduchu nemyslitelné.

Z těchto důvodů je nutné udržovat čidla ve stínu a ve volném prostoru. K tomuto účelu bylo navrženo stínící zařízení z tepelně nevodivého materiálu, ke kterému byla čidla během měření připevněna. První varianta stínící konstrukce sloužila pro měření s termočládky v prvních experimentech. Zhotovena byla z vyřazených dutých nivelačních latí, které velmi dobře tepelně izolují. Druhá konstrukce byla vyrobena z dřevěných prken z důvodu většího rozměru, vyšší nosnosti a odolnosti. Byla používána pro pozdější experimenty s odporovými čidly.

6.2.1 První konstrukce pro termočládky

U prvních experimentů byla použita čidla drátková, která byla osazena ve spojení dvojice čtyřmetrových nivelačních latí do tvaru písmene „L“ s malou stříškou (vyobrazeno na Obr. 16). Použité nivelační latě jsou vyráběny z lamina, dřeva a papíru (kartonu), který je střídán s prázdným prostorem. To jsou všechno materiály, které nedovolují výraznou tepelnou vodivost a roztažnost, což by bylo nežádoucí při nivelaci. Stejně vlastnosti jsou požadovány i pro realizaci stínící konstrukce.



Jako výhoda se ukázala i krabicová libela a metrická stupnice, která usnadnila práci při rozmisťování čidel.

Tato konstrukce byla používána při měření na střeše budovy FSV a byla připevněna ke stávajícímu pilíři nucené centrace.



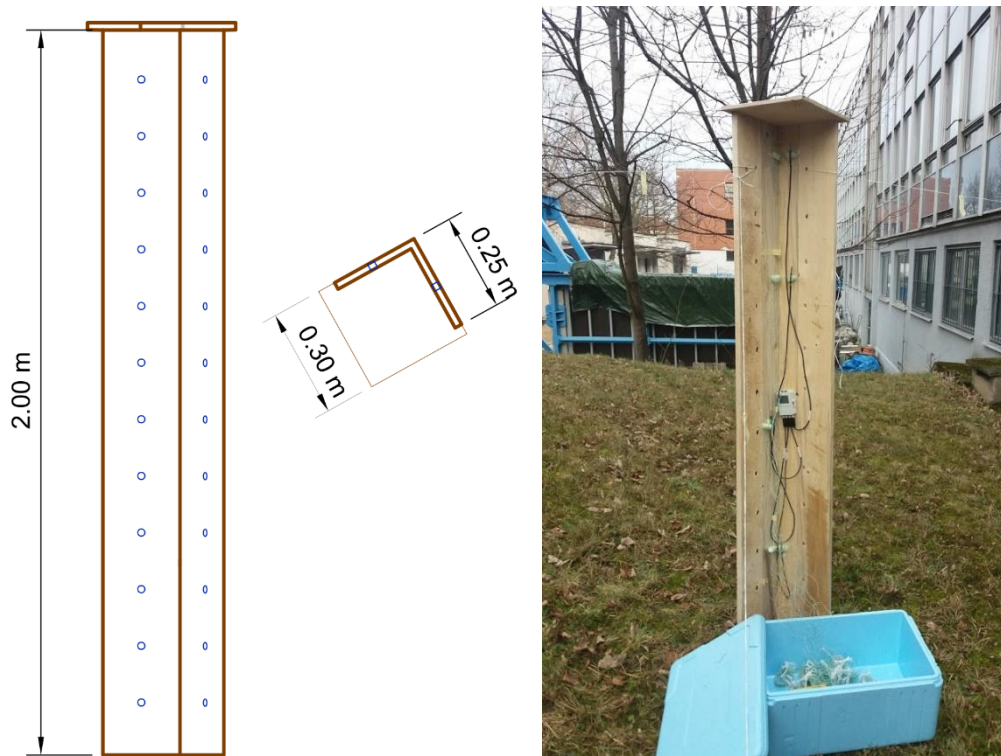
Obr. 16 Stínící konstrukce 1

6.2.2 Druhá konstrukce

Základem stínění (náčrt i provedení na Obr. 17) je dvoumetrový (později čtyřmetrový) profil tvaru “L”. Profil ve tvaru “U” by mohl být již příliš uzavřený a tím by zamezoval přirozenému proudění vzduchu. Tento profil je shora opatřen čtvercovou plochou stříškou s mírným přesahem do všech stran. Hlavním materiálem této konstrukce byla zvolena dřevěná prkna o tloušťce cca 2 cm, které dobře fungují jako stínění i přímá tepelná izolace (nehrozí jejich výrazné rozpálení).

Do profilu “L” byly následně vyvrtány otvory o průměru 1 cm cca po 16 cm ve svislém směru. Díky tomu bylo docíleno lepšího proudění vzduchu v těsném okolí čidel. Všechny otvory byly vrtány ve směru cca 45° do země, aby se zamezilo nežádoucímu slunečnímu záření skrze otvory na čidla.

Do této konstrukce bylo následně umístěno registrační zařízení a jednotlivá čidla (viz 6.1) určující teplotu.



Obr. 17 Stínící konstrukce – náčrt a provedení

Jelikož byla konstrukce při měření umístěna v prostoru, bylo nutné zajistit její polohu a svislost. Ve spodní části byla konstrukce jištěna buď roxory zatlučenými v zemi, nebo pomocí betonových tvárnic. V horní části byla ukotvena pomocí soustavy lan připevněných k okolním objektům.

V pozdějších experimentech byla také využívána konstrukce s výsuvnými nohama popsaná v následující kapitole.

Pro úplnost je třeba říci, že konstrukce došla v průběhu jejího užívání k mnoha vylepšením a drobným modifikacím. Například poměrně brzy došlo k odsazení čidel od konstrukce pomocí polystyrénového hranolu, který dále snížil vliv konstrukce na měřenou teplotu. Pro různé pokusy byla ke konstrukci přidělena další pomocná ramena umožňující zkoumat její vliv. Ve finálních experimentech byl vyzkoušen také stříbrný sprej nastříkaný na polystyren, jímž byla konstrukce zevnějšku obalena. I tento jednoduchý krok mohl snížit teplotní vliv konstrukce.

6.2.2.1 Čtyřmetrová lať a zajištění

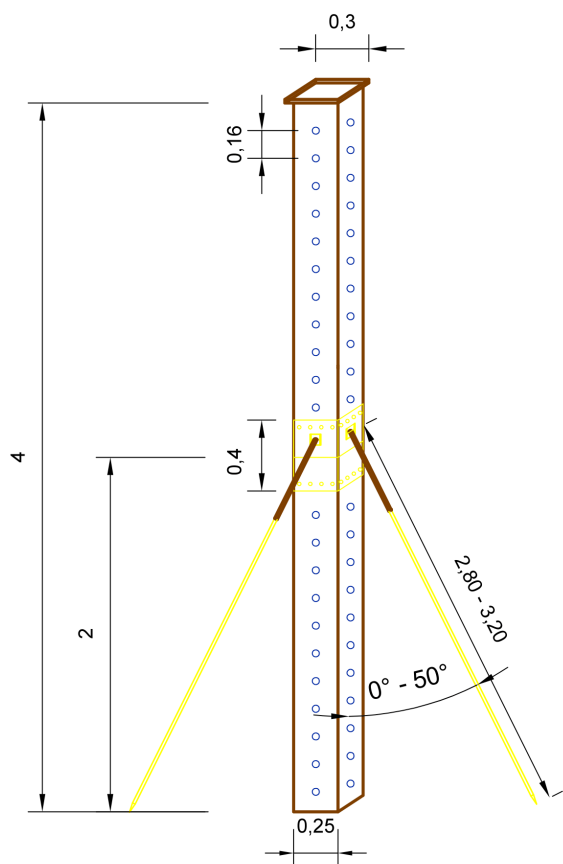
Pro konkrétní pokusy byla konstrukce z důvodu lepšího podchycení jevů navýšena o další 2 m výšky, což způsobilo nemalé komplikace se zajištěním stability konstrukce. Čtyři metry vysoký profil „L“ je prakticky velmi dlouhou pákou a stačil nepatrný vítr a konstrukce zpřetrhala zajišťovací provazy a spadla. Proto byl navržen zajišťovací systém na základě výsuvných podpěr a použití padákového lana pro zajištění horní části (fotografie na Obr. 18).

Zajišťovací systém se skládá z dvojice na sebe kolmých výsuvných nohou spojených s konstrukcí z vnější strany ve výšce 2,10 m. Nohy umožňují náklon ve svislém směru od konstrukce do 50° a společně s možností vysunutí a zasunutí



(minimální délka je 2,80 m a maximální 3,20 m) umožňují relativně pohodlné postavení konstrukce v různém terénu. Jsou vyrobeny z kovové výtyčky prodloužené dřevěnou tyčí zásuvnou do výtyčky. Hrot výtyčky slouží k zabodnutí do země. K patě konstrukce byly navíc umístěny betonové kvádry, které zamezují pohybu ve spodní části.

Druhým prvkem zajištění jsou padáková lana, která jsou přivázána v horní části konstrukce (cca 3,80 m). Padákové lano je vhodné zejména proto, že má velmi malé průtah, takže v případě napnutí drží svůj rozměr. Tato lana jsou jistěna k blízkým pevným bodům ve směru proti nohám. To zajišťuje dostačující stabilitu konstrukce i v případě středně silného větru.



Obr. 18 Stínicí konstrukce 4 m – náčrtek a provedení

6.3 Zařízení pro registraci dat (loggery)

V rámci měření byla použita zařízení pro automatický odečet a registraci teploty – loggery. Pro termočlávková čidla (kapitola 6.1.2) byl použit logger uvedený v kapitole 6.3.1 a pro odporová čidla obou druhů byly použity záznamníky popsány v kapitolách 6.3.2. a 6.3.3.



6.3.1 Datalogger LUTRON BTM-4208SD

Tento záznamník, vyobrazený na Obr. 19, umožňuje současně měřit teplotu na 12 termočláncích typu *K* (kapitola 6.1.2) s přesností 0,4 °C [44]. Data jsou zobrazena na větším černobílém displeji a mohou se ukládat na SD kartu ve formátu CSV. Zařízení je možné napájet kabelem přímo ze sítě nebo šesti tužkovými bateriemi AA. Výdrž baterií je krátká a logger je schopný kompletně vybit baterie za cca 28 h měření po 10 s.

Datalogger disponuje mnoha nastaveními jako jsou frekvence záznamu (1 až 3600 s), nastavení vstupu měřicích čidel (typ J/K/T/E/R/S), nastavení data a času, nastavení jednotek, zvukové signalizace záznamu nebo nastavení podsvícení obrazovky.



Obr. 19 Logger LUTRON BTM-4208SD

6.3.2 Datalogger S 0141

Pro odporové senzory zalité i zapouzdřené (6.1.1) byly použity záznamníky Datalogger S 0141 (Obr. 20), které mají vstup pro 4 čidla. Logger je opatřen menším černobílým displejem a vstupem pro připojení komunikačního adaptéru s PC (formou USB, COM nebo wifi). Disponuje také vestavěnou lithiovou baterií 3,6 V o velikosti AA, která má při daném měření velmi dlouhou životnost (za dobu všech prováděných měření klesla kapacita baterie asi o 3 %). Veškeré ovládání a nastavení se provádí přes počítačový program Comet Vision.



Obr. 20 Logger S0141

Datalogger má daný měřicí teplotní rozsah od -90 °C až 260 °C pro použitou sondu Pt1000. Přesnost vstupu teploty je dána následující tabulkou Tab. 8, kde t je měřená teplota [45].

Tab. 8 Přesnost vstupu teploty u loggeru S0141

Rozsah [°C]	Přesnost [°C]
-90 až -50	$0,004 \cdot t$
-50 až 100	0,2
100 až 260	$0,002 \cdot t$

Následující podkapitola je věnována uvedení přístroje do provozu skrze program Comet Vision a jednotlivá nastavení.

6.3.3 Datalogger U0141

V roce 2023 bylo z důvodu upravení pokusů nutné dokoupit další sady čidel a další digitální záznamníky, nicméně během mezidobí od prvního nákupu došlo k povýšení prodávané série na sérii U a novou variantu (obdobu původních S0141) U0141 (viz Obr. 21).



Obr. 21 Logger U0141 [46]

Způsob zapojení čidel i varianty, které podporuje jsou prakticky stejné, a tak bylo možné jeho snadné zavedení do pokusů a případné kombinování čidel nových a starých dle potřeby. Nová verze především disponuje komunikačním rozhraním postaveném na technologii USB C oproti předchozí optické variantě, která vykazovala drobné chyby při stahování dat do PC [46][47].

Dalším zlepšením je možnost ukládat data v intervalu odečtu každou sekundu, a navíc možnost ukládání maximální a minimální hodnoty určené během zvoleného intervalu. S tím souvisí i zvýšení datového úložiště záznamníku, které již díky své velikosti umožňuje měření celého dne s krátkým intervalem odečtu.

Další parametry a přesnosti jsou prakticky stejné, jako u předchozí verze. Stejně tak jeho ovládání probíhá přes software Comet Vision.

6.3.4 Software Comet Vision

Pro loggery typu S0141 a U0141 (a mnohé další) vyvinula společnost Comet Systém specializovaný software Comet Vision (úvodní menu na Obr. 23) sloužící ke správě a nastavení loggerů.

Při prvním zapojení je nutné vybrat metodu komunikace (USB rozhraní pro S0141 (Obr. 22), USB C pro U0141, COM nebo wifi), zařízení spárovat a pojmenovat.



Obr. 22 USB adaptér S0141



6.3.4.1 Základní nastavení

Dále je nutné pro spuštění záznamu nastavit několik základních parametrů loggeru. Jsou jimi nastavení:

- Aktuálního data a času záznamníku (tento údaj lze převzít ze systému PC),
- intervalu záznamu v rozsahu 10 s až 24 h (20 možností)
 - (pro U0141 také po 1 a 2 s),
- druhu záznamu
 - cyklický – záznamník začne po zaplnění paměti přemazávat nejstarší data,
 - necyklický – záznamník se po zaplnění paměti zastaví,
- pro každý kanál zvolit použité čidlo (Pt1000 nebo Ni1000).

Poté je vhodné nastavit možnosti ovládání magnetem, který umožňuje přístroj zapnout, vypnout nebo vynulovat data min a max. Také můžeme nastavit možnosti alarmu či automatického spuštění záznamu v danou dobu.

Po kompletním nastavení loggeru se konfigurace uloží a je možné začít s měřením teploty – zapnout přístroj. Pro lepší orientaci jsou odečty teplot prováděny v celočíselných násobcích času (např. 15:20, 15:30, 15:40 a nikoli v 15:22, 15:32 a 15:42). Toho se v praxi docílí tak, že přístroj vyčkává na nejbližší čas záznamu od spuštění.

Hlavními funkcemi kromě konfigurace loggeru je samozřejmě uživatelská správa dat. Zde se jedná zejména o stažení dat, smazání paměti a online displej. Program disponuje i dalšími funkcemi pro následnou správu dat, které nebyly pro účely experimentů použity.



Obr. 23 Domovská stránka zařízení (Comet Vision)

6.3.4.2 Stažení a export dat

Stažení dat z loggeru proběhne do souboru v nativním formátu MSX. Následně jsou v programu data prezentována formou tabulky, vývojovým grafem zobrazujícím



všechna čidla, grafy pro jednotlivá čidla nebo matematickou statistikou (počet měření, min, max, průměr, odchylka).

Z tohoto výstupu je možné provést export dat. Export je rozdělen na export z jednotlivých forem (z tabulky, z grafu, z grafů jednotlivých čidel a ze statistiky). Podporovanými formáty jsou CSV, XLS a PDF pro export dat a PDF pro export grafů.

6.3.4.3 Online displej

Při samotném měření jsou na černobílém displeji zařízení zobrazeny jen teploty z prvních dvou čidel (popřípadě min a max). Proto je možné nechat PC připojen a sledovat aktuální teploty měřené na čidlech skrze program. Právě k tomuto slouží funkce online displej, která umožňuje vizualizaci dat formou tabulky nebo obdobně jako v kapitole 6.3.4.2 formou grafů.

6.4 Rozbor přesnosti pro odporová čidla

Obě výše uvedená odporová čidla i obě varianty záznamníků mají určené stejné mezní chyby. Pro výpočet směrodatných odchylek měřených veličin dle zákona hromadění směrodatných odchylek je nutné přejít z mezních chyb na směrodatnou odchylku loggeru σ_L a směrodatnou odchylku senzoru σ_S pomocí koeficientu spolehlivosti $u_p = 2$ (přičemž je pouze orientační, jelikož normalita souboru nebyla statisticky ověřena)

$$\sigma_S = \frac{\Delta t_s}{u_p} = \text{cca } 0,10 \text{ } ^\circ\text{C až } 0,13 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad \sigma_L = \frac{\Delta t_L}{u_p} = 0,10 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (6.1)$$

kde Δt_L je mezní chybou pro určení odečtu loggerem a Δt_s je mezní chybou čidla. Jelikož je přesnost určení teploty čidlem závislá i na její absolutní velikosti, je u σ_S výsledkem interval odpovídající měření v rozsahu teplot obvyklých pro naše zeměpisné podmínky během roku. Následně lze odvodit přesnost určené teploty σ_t jako

$$\sigma_t = \sqrt{\sigma_S^2 + \sigma_L^2} = 0,15 \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (6.2)$$

Výsledná přesnost určení teploty tedy činí $\sigma_T = 0,13$ až $0,16 \text{ } ^\circ\text{C}$ v daném teplotním intervalu. V dalších rozbořích budeme uvažovat $\sigma_t = 0,15 \text{ } ^\circ\text{C}$, která také odpovídá dlouhodobému pozorování.

Jelikož směrodatnou odchylku určení teploty lze považovat pro všechny senzory za stejnou, můžeme směrodatnou odchylku rozdílu teplot $\sigma_{\Delta t}$ vypočítat podle

$$\sigma_{\Delta t} = \sigma_t \cdot \sqrt{2} = 0,21 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (6.3)$$

s mezní chybou $\Delta M_t = 0,42 \text{ } ^\circ\text{C}$. Pro teplotní gradient se směrodatná odchylka $\sigma_{\nabla t}$ určí jako

$$\sigma_{\nabla t} = \frac{\sigma_{\Delta t}}{d}, \quad (6.4)$$

kde d je vertikální vzdálenost mezi čidly. Po dosazení do rovnice dostaneme výsledky uvedené v Tab. 9.



Tab. 9 Přesnost teplotních gradientů

Rozsah gradientu	(0,5–1,0 m)	(1,0–1,5 m)	(1,5–1,9 m)
$\sigma_{\nabla t}$ [°C/m]	0,42	0,42	0,53

Je ještě nutné dodat, že reálná přesnost určení teplotního gradientu bude poněkud lepší, jelikož uvedený rozbor přesnosti nezohledňuje systematické vlivy působící na měřené teploty jedním loggerem ve stejný okamžik (například lze očekávat vyloučení či potlačení vlivu σ_L u numericky blízkých teplot měřených v krátkém časovém intervalu).



7 Výpočet vlivu refrakce na převýšení

Dráha světla se vlivem refrakce zakřivuje, to prakticky znamená, že se pozorovaný cíl zdánlivě posune. Vlivem toho je měřený vodorovný směr a zenitový úhel zatížen chybou. Tato chyba je definována tečnou k refrakční křivce v místě měření. V případě refrakce v přízemní úrovni atmosféry je její vertikální složka mnohem výraznější, jak bylo uvedeno výše. To znamená, že při trigonometrickém měření výšek a převýšení je ovlivněn zenitový úhel. Tento vliv pak zapříčiní chybu v určeném převýšení cíle.

Výpočet opravy vlivu vertikální refrakce je již dlouho předmětem výzkumu geodetických odborníků. V následujících odstavcích bude představeno a porovnáno několik z nich v připravených simulacích. V první podkapitole budou představeny dvě metody popisující fyzikální přístupy vyžadující znalost indexu lomu vzduchu. Ve druhé pak zjednodušené modely vycházející ze znalosti teplotního gradientu.

7.1 Index lomu vzduchu

Index lomu n [48][49] je koeficient popisující poměr mezi rychlostí světla ve vakuu c a rychlostí světla v v daném médiu

$$n = \frac{c}{v}. \quad (7.1)$$

Jeho určení je možné buď experimentálně (přímo), nebo nepřímo měřením vybraných veličin, na kterých závisí, a následným dosazením do experimentálně určených matematických formulací. Vzhledem k tomu, že přímé určování indexu lomu není pro klasickou geodézii vhodné (zajímá nás index lomu vzduchu ve vnějším prostoru, kde se mění), tak je následující text zaměřen na nepřímé určování indexu lomu.

Pro praktické použití je nutné rozlišit fázový index lomu vzduchu (n) a skupinový (grupový) index lomu vzduchu (n_g).

Fázový index lomu vzduchu definuje fázovou rychlost vlny, a proto platí pouze pro jednu konkrétní vlnovou délku. Tento přístup se uplatňuje v laboratorních podmínkách například s použitím laseru, který má velmi úzké spektrum vlnové délky – je prakticky monochromatický. Dále je vhodné jeho použití v případě výpočtu refrakce.

Oproti tomu skupinový index lomu popisuje rychlost šíření signálu (obálku amplitudy). Pokud se společně s hlavní vlnovou délkou šíří také svazek přidružených vlnových délek, tak spolu blízké vlny, které se však šíří různou rychlostí, interferují a díky tomu je šíření signálu obecně pomalejší než šíření svazku o jedné vlnové délce. Skupinový index lomu vzduchu je definován vztahem

$$n_g = n - \frac{dn}{d\lambda} \cdot \lambda, \quad (7.2)$$

kde λ je vlnová délka záření a $\frac{dn}{d\lambda}$ je změna indexu lomu v závislosti na vlnové délce.



Následující text popisující odvození a ustanovení výpočtu indexu lomu čerpá z článku F. Dvořáčka [50] a z [51]. Nejznámější výpočet fázového indexu lomu vzduchu využívaný pro obor geodézie přinesli na základě svých několikaletých experimentů Barrell a Sears ve své práci [52]. Výsledkem byl v roce 1939 vztah

$$(n - 1) \cdot 10^6 = \left[0,378125 + \frac{0,0021414}{\lambda^2} + \frac{0,00001793}{\lambda^4} \right] \cdot \frac{p \cdot [1 + (1,049 - 0,0157 \cdot t) \cdot p \cdot 10^{-6}]}{1 + 0,003661 \cdot t} - \left(0,0624 - \frac{0,000680}{\lambda^2} \right) \cdot \frac{e}{1 + 0,003661 \cdot t}, \quad (7.3)$$

kde λ je vlnová délka záření v μm , t je teplota vzduchu ve $^{\circ}\text{C}$, p je atmosférický tlak v torrech a e je tlak vodních par v torrech.

Derivací této rovnice dle vlnové délky se získá vztah $\frac{dn}{d\lambda}$, který po dosazení do rovnice (7.2) umožní výpočet skupinového indexu lomu vzduchu.

V roce 1953 vyšel článek B. Edléna [53] vyhodnocující dohromady pokusy Barrella a Searse, Kocha a Trauba. Výsledkem byla rovnice popisující index lomu při normálních podmínkách vzduchu, které definoval teplotou 15°C , tlakem 760 torrů, 0% relativní vlhkostí a 300 ppm podílu CO_2 . Výsledný vztah je především vhodný pro výpočet indexu lomu viditelného a ultrafialového světla

$$(n - 1) \cdot 10^8 = 6432,8 + \left(\frac{2949810}{146 - \sigma^2} \right) + \left(\frac{25540}{41 - \sigma^2} \right), \quad (7.4)$$

kde σ je v tomto případě vlnové číslo a je rovno převrácené hodnotě vlnové délky λ . Vzorec neumožňuje zohlednit aktuální atmosférické podmínky, a proto se nehodí pro geodetické využití.

Nicméně, vzhledem k očividné složitosti výrazu (7.3), byla v roce 1963 přijata na konferenci IUGG (International Union of Geodesy and Geophysics) v Berkley nová zjednodušená forma vzorce dle [50]. Tento vzorec je odvozen z prací Barrella a Searse a také Edléna

$$N = (n - 1) \cdot 10^6 = 287,604 + \left(\frac{1,6288}{\lambda^2} \right) + \left(\frac{0,0136}{\lambda^4} \right). \quad (7.5)$$

Tento vztah platí pro takzvané normální podmínky atmosféry. Konkrétně pro vzduch o teplotě 0°C , tlaku 1013,25 hPa, 0% relativní vzdušné vlhkosti a CO_2 o podílu 300 ppm. V případě obecných atmosférických podmínek je potřeba zavést opravu z teploty, tlaku a vlhkosti (tlaku vodních par), které vychází z prací Barrella a Searse. Jak je uvedeno ve vztahu

$$n = 1 + \left(\left(\frac{N}{1 + \left(\frac{t}{273,15} \right)} \right) \cdot \left(\frac{p}{101325} \right) - \left(\frac{5,5 \cdot 10^{-2}}{1 + \left(\frac{t}{273,15} \right)} \right) \cdot \left(\frac{e}{133,322} \right) \right) \cdot 10^{-6}, \quad (7.6)$$



kde N je index lomu pro normální podmínky, t je teplota vzduchu ve $^{\circ}\text{C}$, p je atmosférický tlak v hPa a e je tlak vodních par v hPa. Tato oprava více méně reflektuje potřeby geodézie a umožňuje spočítat aktuální index lomu vzduchu pomocí relativně snadno měřitelných definujících parametrů.

Novější autoři Ciddor a Hill [54][55][56] vytvořili přesnější a složitější formulace pro výpočet indexu lomu vzduchu. Vzhledem k tomu, že je přesnost výše uvedených rovnic pro následující výpočty dostačující, tak byly použity vztahy založené na práci Barrella a Searse.

7.2 Teplotní gradient

Teplotní gradient ∇t je v této aplikaci chápán jako změna teploty v prostoru v závislosti na změně pozice r (dráhy).

$$\nabla t(r) = \begin{pmatrix} dt(r)/dX \\ dt(r)/dY \\ dt(r)/dZ \end{pmatrix}, r = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}, \quad (7.7)$$

kde X, Y, Z jsou pravoúhlé souřadnice bodu v prostoru a dX, dY, dZ jsou jejich změny. To prakticky znamená, že k určení teplotního gradientu je třeba určovat teplotu v prostoru. Způsob měření teploty a teplotního gradientu a použité pomůcky jsou popsány v kapitolách 5.1, 5.3 a 6.

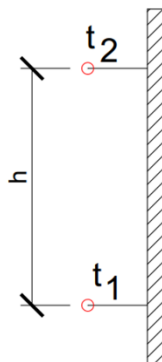
Vzhledem k tomu, že se v následujících řádcích zabýváme jen vlivem teploty na měření převýšení, pro zjednodušení můžeme vztah upravit pro souřadnici z a získat tak vertikální teplotní gradient ∇t_v , který je závislý jen na výšce Z

$$\nabla t_v(Z) = (dt(Z)/dZ). \quad (7.8)$$

V tomto případě nás tedy zajímá změna teploty na jednotku délky (výšky). V souladu s úvahou v kapitole 5.2 popisující vliv výšky nad terénem na teplotu v přízemní úrovni atmosféry by vhodnější formulace gradientu měla být závislá na výšce nad terénem h_t .

$$\nabla t_v(h_t) = (dt(h_t)/dh_t). \quad (7.9)$$

Nicméně samotný gradient lze spočítat snadno ze současného měření dvojice teplotních čidel umístěných vertikálně nad sebou (viz Obr. 24).



Obr. 24 Výpočet vertikálního teplotního gradientu

Výsledný vztah pro vertikální teplotní gradient mezi dvěma čidly je roven

$$\nabla t_v = \frac{(t_2 - t_1)}{h}, \quad (7.10)$$

kde t_1 a t_2 jsou teploty určené na čidlech 1 a 2 a h je vertikální vzdálenost mezi čidly.

7.2.1 Výpočty vlivu refrakce ze znalosti teplotního gradientu

V minulosti byly sestaveny vztahy popisující výpočet refrakčního koeficientu ze znalosti teplotního gradientu. Následným přechodem z refrakčního koeficientu na zdánlivý posun můžeme těmito postupy určit vliv vertikální refrakce. Vztah mezi refrakčním koeficientem a zdánlivým posunem je dán svou definicí a je uveden v kapitole 4.2.1.

V odborných člancích je často zmiňovaný vztah uvedený například v knize [57] z roku 1987 publikované Kharaghanim. V České republice a na Slovensku je velmi známý z něj odvozený zjednodušený vztah profesora Böhma, který jej publikoval a vyučoval [1].

7.2.1.1 Refrakční koeficient – Kharaghani

Vztah popisující závislost refrakčního koeficientu na atmosférických podmínkách je uveden v [57], kde autor vysvětluje, že je možné k němu dojít pomocí derivace vztahu pro výpočet index lomu (uvádí zde variantu přijatou International Association of Geodesy a uvedenou například [58]). Ten se mírně liší v některých koeficientech od vztahu uvedeném v kapitole 7.1, nicméně pro praktické účely dává stejné výsledky

$$(n - 1) = N \cdot 10^{-6} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{t}{273}\right)} \cdot \frac{p}{1013,25} - \frac{4,2 \cdot e}{\left(1 + \frac{t}{273}\right)} \cdot 10^{-8}. \quad (7.11)$$

Dále autor uvádí vztah po dosazení průměrné vlnové délky viditelného světla $\lambda = 0,56 \mu\text{m}$ do vztahu pro N (viz rovnice (7.5))



$$(n - 1) = 293 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{t}{273}\right)} \cdot \frac{p}{1013,25} - \frac{4,2 \cdot e}{\left(1 + \frac{t}{273}\right)} \cdot 10^{-8}. \quad (7.12)$$

Pro naše potřeby byla rovnice přepočítána pro použitou vlnovou délku, výsledky se prakticky neliší. Derivací tohoto vztahu pro index lomu dle výšky Z získáme vertikální gradient.

$$\frac{dn}{dZ} = \frac{78,9}{t_k} \cdot \left(\left(\frac{dp}{dZ} - 0,14 \cdot \frac{de}{dZ} \right) - \left(\frac{p - 0,14 \cdot e}{t_k} \right) \cdot \frac{dt_k}{dZ} \right) \cdot 10^{-6}, \quad (7.13)$$

kde t_k je teplota v kelvinech, vztah $(0,14 \cdot e)$ je zanedbatelný a člen $\left(0,14 \cdot \frac{de}{dZ}\right)$ je běžně méně než 2 % vlivu oproti $\frac{dp}{dZ}$, a tak je možné jej vypustit. Závislost změny teploty na výšce je vertikálním teplotním gradientem $\frac{dt_k}{dZ} = \nabla t_v$. Vertikální gradient tlaku můžeme vyjádřit vztahem uvedeným v příspěvku pana Bomforda 1971 [58]

$$\frac{dp}{dZ} = -\frac{g}{M} \cdot \frac{p}{t_k}, \quad (7.14)$$

kde g je gravitační zrychlení a M konstanta suchého vzduchu, celkový podíl $\frac{g}{M}$ se uvádí roven 0,0342 K/m [59]. Těmito úpravami a dosazeními získáme zjednodušený vztah vertikálního gradientu indexu lomu

$$\frac{dn}{dZ} = \frac{78,9 \cdot p}{t_k^2} \cdot \left(0,0342 - \frac{dt_k}{dZ} \right) \cdot 10^{-6}. \quad (7.15)$$

Díky tomu je možné ze znalosti atmosférických veličin teploty, teplotního gradientu a tlaku určit vertikální gradient indexu lomu, který je možné, jak uvádí Kharaghani, přepočítat na poloměr refrakční kružnice R_k pomocí úvahy

$$\frac{1}{R_k} = -\frac{dn}{dZ} \cdot \sin(z), \quad (7.16)$$

kde z je zenitový úhel. Refrakční koeficient pak získáme jako podíl poloměru refrakční křivky a poloměru Země (viz kapitola 4.2.1)

$$k = \frac{R}{R_k}. \quad (7.17)$$

Po zjednodušení a dosazení poloměru země $R = 6371$ km získáme vztah pro refrakční koeficient

$$k = \frac{502,7 \cdot p}{t_k^2} \cdot \left(0,0342 - \frac{dt}{dZ} \right). \quad (7.18)$$



Refrakční koeficient je možné následně převést dle rovnice (4.26) na vertikální zdánlivý posun. Je potřeba ještě zdůraznit, že tento výpočet uvažuje stejný gradient indexu lomu (teploty, tlaku, ...) po celé dráze měření, což není obecně správně.

7.2.1.2 Refrakční koeficient – Gauss (Böhm)

Zjednodušený model profesora Böhma [1] pro výpočet vertikálního posunu ΔH dle [1] vychází ze stejného předpokladu jako předchozí kapitola a uvádí následující výpočet vycházející z rovnice (7.18) popisující výpočet refrakčního koeficientu ze znalosti atmosférických veličin a rovnice (4.26). Dosazením průměrných „standardních“ podmínek atmosféry ($t = 15\text{ }^\circ\text{C}$ a $p = 97,3\text{ kPa}$) a jeho dosazením do rovnice (4.26) lze získat zjednodušený vztah v následujícím tvaru

$$\Delta H = 4,65 \cdot 10^{-7} \cdot s^2 \cdot \sin(z) \cdot \left(0,034 + \frac{dt}{dz}\right), \quad (7.19)$$

kde s je vodorovná délka, z je zenitový úhel a $\frac{dt}{dz} = \nabla t_v$ je vertikální teplotní gradient (předpokládající stejný gradient po celé dráze). Díky této úpravě byly z obecnějšího vztahu odstraněny parametry teploty a tlaku (ačkoli samotná nutnost měření teplotního gradientu prakticky vyžaduje měření teploty jako takové).

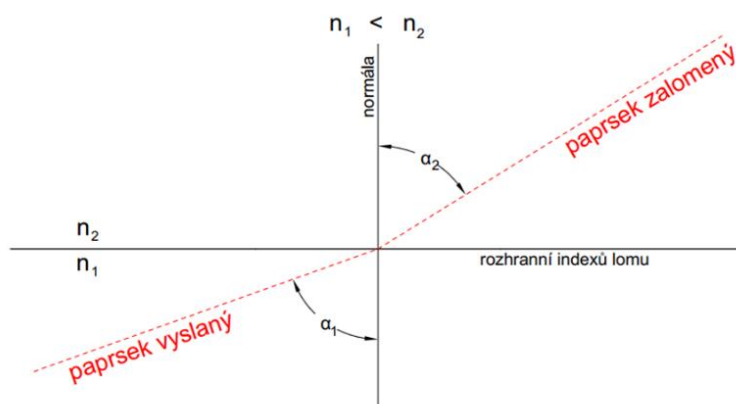
Je vhodné zmínit, že se v literatuře vyskytují i drobné obměny tohoto vztahu s odlišným prvním koeficientem uvažujícím různé stavy atmosféry.

7.2.1.3 Snellův zákon

Pokud známe index lomu, pak je možné jej využít ve Snellově zákoně [60][48] (Obr. 25) o odrazu a lomu (odvozeném v kapitole 2). Zjednodušeně řečeno nám tento zákon popisuje, jak se změní dráha světla (elektromagnetického záření), pokud přechází přes rozhraní dvou prostředí s odlišnými optickými vlastnostmi – s odlišným indexem lomu. Základní tvar rovnice

$$\sin(\alpha_1) \cdot n_1 = \sin(\alpha_2) \cdot n_2, \quad (7.20)$$

kde α_1 je úhel mezi směrem dopadu paprsku a normálou – úhel dopadajícího svazku, α_2 je úhel mezi směrem lomeného paprsku a normálou – úhel lomeného svazku. Dále n_1 a n_2 jsou indexy lomu definující prostředí mezi kterými se šíří paprsek.



Obr. 25 Snellův zákon



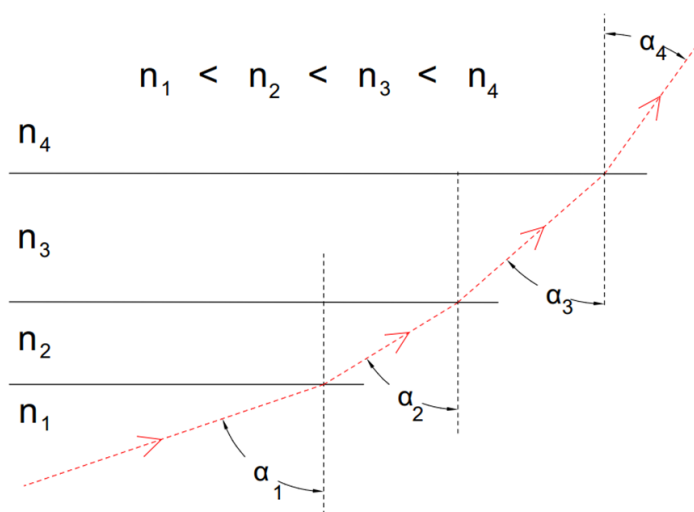
Další forma zápisu popisuje známý vztah mezi indexem lomu a rychlostí

$$\frac{\sin(\alpha_1)}{\sin(\alpha_2)} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}, \quad (7.21)$$

kde v_1 a v_2 jsou rychlosti šíření záření v prostředí definovaném indexem lomu n_1 a n_2 .

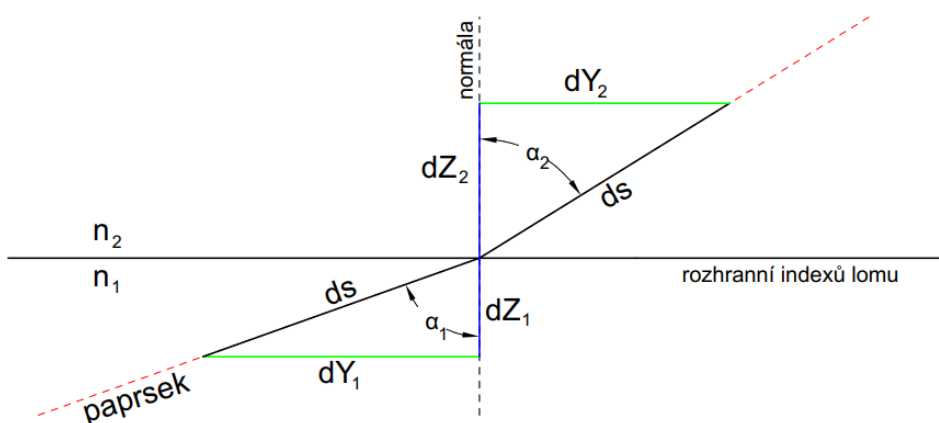
Pokud paprsek přechází z prostředí s nižším indexem lomu (opticky řidší prostředí) do prostředí s vyšším indexem lomu (opticky hustší prostředí), pak hovoříme o lomu ke kolmici. Naopak pokud jde z opticky hustšího prostředí do řidšího, pak se jedná o lom od kolmice.

Při průchodu atmosférou ovšem nedochází k jednomu výraznému lomu (jako je tomu například při přechodu mezi vzduchem a vodou), ale prakticky jde o lom v každém bodě dráhy. Schématicky je to zobrazeno na obrázku Obr. 26.



Obr. 26 Vícenásobný Snellův zákon

V tom případě ovšem musíme Snellův zákon vyjádřit v diferenciální podobě dle Obr. 27, na kterém je zobrazen v rovině Y a Z .



Obr. 27 Diferenciální tvar Snellova zákona



Definujeme si diferenciálně malý krok dráhy paprsku ds , na základě kterého si můžeme vyjádřit změnu pozice dráhy v rovině Y a Z jako dY a dZ .

Obecné vztahy mezi elementem dráhy a změnou souřadnic jsou rovny

$$dY = \sin(\alpha_1) * ds, \quad dZ = \cos(\alpha_1) * ds. \quad (7.22)$$

Z toho lze odvodit výsledný vztah zahrnující indexy lomu

$$\frac{dY_1}{dt} \cdot n_1 = \frac{dY_2}{dt} \cdot n_2. \quad (7.23)$$

Pokud známe výchozí pozici záření (první bod trajektorie) a její výchozí směr definovaný například pomocí úhlu α_1 , který je v rámci obrázku prakticky shodný s úhlem zenitovým, tak můžeme se znalostí indexů lomu snadno spočítat pozici bodu následujícího

$$dY_2 = dY_1 \cdot \frac{n_1}{n_2}, \quad dZ_2 = \sqrt{ds^2 - dY_2^2}. \quad (7.24)$$

Pokud se zvolí dostatečně malý krok ds , pak je možné použít předchozí vztahy pro iterativní výpočet skutečné dráhy paprsku. Podmínkou samozřejmě je znalost indexu lomu a jeho gradientu po celé dráze paprsku, což je prakticky nemožné. Proto je třeba uvážit vhodný model atmosféry a vhodný postup měření, o kterém je psáno v kapitole 5.3.

Dále je potřeba upozornit na největší nedostatek diferenciální podoby Snellova zákona, a to stav, kdy dochází k šíření paprsku kolmo na vrstvy atmosféry, nebo ve směru vrstev. V tomto případě výpočet selhává a není možné jej použít. To ovšem silně omezuje jeho použitelnost, jelikož při průchodu nehomogenní atmosférou obecně k takovému stavu dochází a výsledek zpravidla zcela selže. Proto je možné tento výpočet použít jen u jednoduchých výpočtů uvažujících například stejný teplotní gradient po celé dráze paprsku.

7.2.1.4 Přímý výpočet pomocí DRPV

DRPV (Diferenciální rovnice průchodu vlnoplochy nehomogenním prostředím) také známá jako paprsková rovnice je fyzikální vztah popisující změnu směru paprsku (svazku paprsků) závislou na indexu lomu a změně (gradientu) indexu lomu daného prostředí (odvozený v [61][62][63][32] a použitý v [64][37]). Celý vztah dle [32] lze zapsat

$$\frac{d^2r}{dt^2} = n(r) \cdot \nabla n(r) = f(r), \quad (7.25)$$

$$r = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}, \quad n(r) = n(X, Y, Z), \quad \nabla n(r) = \begin{pmatrix} dn(r)/dX \\ dn(r)/dY \\ dn(r)/dZ \end{pmatrix}, \quad (7.26)$$



kde průvodič r definuje konkrétní bod na dráze paprsku a je vyjádřený v souřadnicích, n je index lomu prostředí a ∇n je gradient indexu lomu ve směrech souřadnicových os. Proměnná t je dráha po které se „bod“ (paprsek) pohybuje a dt je diferenciální element dráhy.

Výpočet je realizován iterativně a pro lepší pochopení lze zavést označení

$$u = \frac{dr}{dt}, \quad \frac{du}{dt} = \frac{d^2r}{dt^2}, \quad (7.27)$$

ze kterého je patrné, že první derivací polohy (změna polohy) je směr u (směrový vektor v daném iteračním kroku) a následnou derivací směru je pak logicky změna směru. Celý vzorec tedy popisuje změnu směru paprsku v závislosti na změně indexu lomu (a jeho gradientu). Díky tomu jsme schopni postupně vypočítat změnu směru v každém bodě trajektorie (pokud známe index lomu a jeho gradient pro každý bod dráhy) a tím určit tvar refrakční křivky.

Samotný výpočet trajektorie paprsku je tedy iterativní a postupuje po vhodné malých úsecích (krocích iterace), při kterých v dané přesnosti již nedochází ke ztrátě přesnosti způsobené velikostí kroku. Ze znalosti křivky vypočítané (simulované refrakční křivky) a přímé spojnice lze zjistit vertikální zdánlivý posun způsobený refrakcí.

7.2.1.4.1 Iterativní výpočet dráhy paprsku

Pro výpočet zdánlivého vertikálního posunu ΔH (respektive výškového odklonu skutečné dráhy od přímé) lze použít DRPV, které je schopné započítat jakékoli změny v teplotním poli (pokud jsou podchyceny měřením).

Výška bodu H_{ref} v bodě dráhy je tedy prakticky funkcí následujících proměnných:

- vzdáleností s od vyslaného místa,
- výchozího směru vyslání paprsku (pro výpočet pouze vertikálního vlivu refrakce je jím zenitovým úhlem z_0),
- indexu lomu a jeho gradientu (který je především funkcí teploty t a teplotního gradientu ∇t) v každém bodě dráhy,

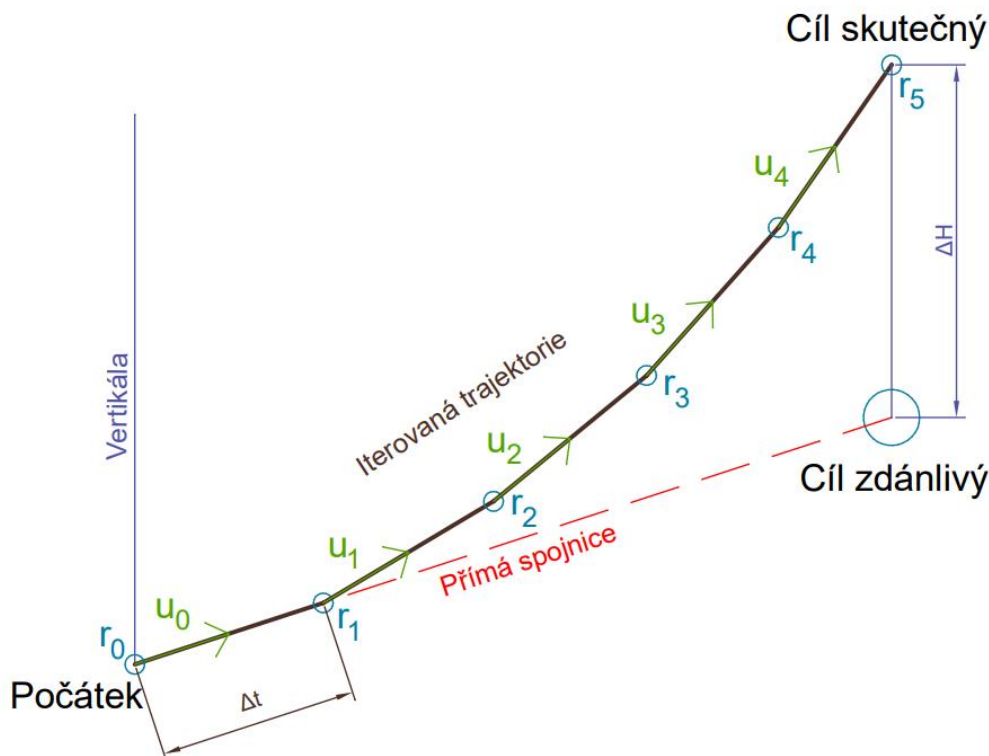
$$H_{ref} = \text{DRPV}(\nabla t, s, z_0, \dots). \quad (7.28)$$

Jak již bylo řečeno výše, pro výpočet je potřeba zvolit dostatečně malý krok iterace tak, aby bylo možné použít $dt = \Delta t$. Díky tomu lze zapsat vztah pro postupnou iteraci pomocí následujících rovnic

$$r_{i+1} = r_i + u_i \cdot \Delta t, \quad (7.29)$$

$$u_{i+1} = u_i + f(r_{i+1}) \cdot \Delta t = u_i + n(r_{i+1}) \cdot \nabla n(r_{i+1}) \cdot \Delta t. \quad (7.30)$$

Logika výpočtu je zobrazena na následujícím obrázku Obr. 28.



Obr. 28 Schéma iterace DRPV

Pokud je znám měřený počáteční vektor (z_0), lze spočítat skutečnou polohu cíle. Obvykle se řeší zejména vertikální složka refrakce (neboť je obecně významně větší), výpočet pak lze zjednodušit do dvourozměrného prostoru X, Z (podélná a svislá složka trajektorie) prostým vynecháním příčné složky y .

Jelikož není možné měřit potřebné veličiny pro výpočet indexu lomu vzduchu v celém prostoru dráhy, je potřeba zvolit / vypočítat model (prostorové pole) postihující změnu indexu lomu v prostoru. Vzhledem k výše uvedeným skutečnostem je jasné, že index lomu závisí v tomto případě především na teplotě, a tak se i problém určování indexu lomu (a jeho gradientu) redukuje na problém určování teploty (a jejího gradientu).

Po dokončení výpočtu (dovršení měřené dráhy s) je koncový bod ve výšce, která obecně neodpovídá přímému šíření paprsku (určené například trigonometrickou nivelací H_{TS}). Jejich rozdíl je pak zdánlivý vertikální posun ΔH způsobený refrakcí

$$\Delta H = H_{ref} - H_{TS}. \quad (7.31)$$

Ze získaného vertikálního posunu lze zpětně spočítat refrakční úhel u stanoviště β_1 . Pro $z \approx 100$ gon také platí následující zjednodušení

$$\beta_1 = \frac{\sin(z_0) \cdot \Delta H}{s / \sin(z_0) - (\cos(z_0) \cdot \Delta H)} \approx \frac{\Delta H}{s}. \quad (7.32)$$



Nově určený správný zenitový úhel z_1 lze získat například upravením výchozího zenitového úhlu z_0 o refrakční úhel

$$z_1 = z_0 + \beta_1. \quad (7.33)$$

7.2.1.4.2 Kontroly iterace

Pro ověření numerické stability iterativního výpočtu je vhodné zavést kontroly. Nejjednodušším druhem kontroly je provést výpočet s různými variantami velikosti kroků iterace Δt . Pokud se snížením kroku prakticky nezmění výsledek výpočtu, pak je možné jej považovat za dostatečně malý. Pro většinu výpočtů byl volel krok v rozsahu 2 mm až 2 cm.

Další možností je kontrola protisměrným výpočtem. Po vypočítání iterované výšky H_{ref} je možné vypočítat opačný směr šíření paprsku (od cíle k vysílači) s tím, že je možné zavést již opravený protisměrný zenitový úhel z_1 . Kontrolou pak je, že dráhy musejí být identické, což plyne z Fermatova principu. Kontrola identity drah je možná porovnáním výšek jednotlivých určených bodů obou drah (tam a zpět).

Zdlouhavější, ale v jistém smyslu bezpečnější kontrolou je použití původního zenitového úhlu z_0 pro výpočet protisměrného úhlu. Pak je potřeba výpočet opakovat se zavedením oprav výchozího úhlu do chvíle, kdy se sjednotí určený počáteční bod (jeho výška) s výškou zadanou. Kontrolou je opět identičnost drah.

U výpočtů v následujících experimentech byly vždy ověřovány oba zmíněné druhy kontrol tak, aby nedošlo k chybnému určení hodnot vlivem nestabilního nebo nevhodného nastavení iterace.

7.2.1.5 Porovnání výpočetních metod uvažujících teplotní gradient

Nejjednodušším fyzikálním přístupem je zmíněný Snellův zákon (7.2.1.3) ve svém diferenciálním tvaru, ten ovšem můžeme nasadit pro výpočty s omezením, kdy máme teplotní pole homogenní nebo ještě lépe kdy je teplotní gradient po dráze paprsku konstantní.

Pro přesný výpočet dráhy paprsku lze použít diferenciální rovnici průchodu vlnoplochy nehomogenním prostředím (7.2.1.4). Tento vztah je fyzikálně korektní a definuje změnu dráhy v závislosti na indexu lomu a jeho změně.

Dále jsou k dispozici dvě metody výpočtu vycházející přímo z derivací indexu lomu podle výšky (určení vertikálního gradientu indexu lomu) a následným přechodem refrakčního koeficientu na vertikální posun. Jsou jimi metoda popsaná v Kharaghanim (7.2.1.1) a zjednodušený vzorec prof. Böhma (7.2.1.2).

Pokud se zaměříme na vertikální stratifikaci atmosféry, pak logicky nejvíce ovlivňuje měření zenitových úhlů. Z toho vyplývá, že se u měření s totální stanicí nejvíce projevuje na určených výškách bodů.

V následujících řádcích a tabulkách budou prezentovány nasimulované výsledné chyby způsobené průchodem paprsku nehomogenním prostředím (v našem případě s různou teplotou a gradientem).



U obou iteračních modelů (Snellův i DRPV) byl výpočet prováděn s krokem $dt = 0,0001$ m (pro tyto výpočty dostačující). Výsledný vertikální posun se na závěr vypočte jako rozdíl výšky určené trigonometricky (po přímce) a výšky určené z výpočtu simulace dráhy.

Pro výpočet modelů bylo uvažováno viditelné světlo o vlnové délce $\lambda = 0,555$ μm , normální tlak $p = 101325$ Pa a tlak vodních par $e = 0$ Pa.

Pro demonstraci vlivu teploty na určování výšky byly zvoleny teplotní gradienty, které reálně mohou nastat (viz kapitola 8.3) v intervalu $\nabla t_v = -2$ až 10 $^{\circ}\text{C}/\text{m}$, pro vybrané délky $s = 10$ až 1000 m a vybrané zenitové úhly $z = 50$ až 150 gon.

V následující Tab. 10 jsou srovnány jednotlivé metody určení zdánlivého vertikálního posunu pro případ, kdy je výška stroje $1,5$ m, teplota u povrchu 28 $^{\circ}\text{C}$, $\nabla T = 5$ $^{\circ}\text{C}/\text{m}$, $s = 10$ až 1000 m a $z = 90$ gon.

Tab. 10 Porovnání metod

Vzdálenost [m]	Zdánlivý vertikální posun [mm]			
	Khara.	Böhm	Snell	DRPV
10	-0,22	-0,23	-0,20	-0,20
20	-0,88	-0,92	-0,83	-0,83
50	-5,50	-5,78	-4,96	-4,96
100	-22,01	-23,12	-18,42	-18,43
200	-88,03	-92,48	-64,72	-64,75
500	-550,17	-578,00	-299,37	-299,49
1000	-2200,67	-2311,99	-847,71	-848,03

Musím zde upozornit, že je uvažován **konstantní gradient**, což na delší vzdálenosti obecně není pravda. Teplota jistě v určité výšce začne klesat, ale uvedený gradient 5 $^{\circ}\text{C}/\text{m}$ je opravdu vysoký a platí jen pro přízemní úroveň atmosféry.

Z tabulky je dobře vidět, že jednodušší modely dobře fungují na kratší vzdálenosti (do cca 50 metrů), ale začínají se více rozcházet s přesnějšími iterativními metodami na větší vzdálenosti a pro délku záměry 200 m již dosahuje rozdíl cca 30 % opravené hodnoty. Můžeme zde také vidět, že oba jednoduché výpočetní modely jsou si numericky velmi blízké ve všech variantách výpočtu. V případě iterativních metod jsou jejich výsledky prakticky stejné a jediným rozdílem je obecnější fungování metody DRPV.

7.2.1.6 Vliv teplotního gradientu na zdánlivý posun

V následujících tabulkách jsou různé varianty výpočtu pomocí DRPV, který by měl být z výše uvedených metod využívajících teplotní gradient nejpřesnější.

Tab. 11 prezentuje data s proměnnou vzdáleností, teplotním gradientem, ale s konstantním zenitovým úhlem $z = 90$ gon.



Tab. 11 Vliv vzdálenosti a teplotního gradientu

Vzdálenost [m]	Teplotní gradient [°C/m]				
	-2	-1	1	2	5
	Vertikální zdánlivý posun [mm]				
10	0,10	0,05	-0,04	-0,08	-0,20
20	0,38	0,19	-0,17	-0,34	-0,83
50	2,40	1,17	-1,10	-2,13	-4,96
100	9,95	4,75	-4,32	-8,29	-18,43
200	43,18	19,70	-16,75	-31,21	-64,75
500	371,07	139,52	-95,63	-166,12	-299,49

V Tab. 12 jsou data z výpočtu s proměnným zenitovým úhlem a teplotním gradientem. Vzdálenost $s = 50$ m je konstantní.

Tab. 12 Vliv zenitového úhlu a teplotního gradientu

Zenitový úhel [gon]	Teplotní gradient [°C/m]				
	-2	-1	1	2	5
	Vertikální zdánlivý posun [mm]				
60	4,17	1,86	-1,54	-2,81	-5,81
70	3,22	1,49	-1,27	-2,45	-5,19
90	2,40	1,17	-1,10	-2,13	-4,96
100	2,25	1,11	-1,09	-2,16	-5,25
110	2,22	1,12	-1,15	-2,31	-5,90
130	2,53	1,29	-1,47	-3,12	-9,32
140	2,94	1,56	-1,84	-4,00	-13,91

V poslední Tab. 13 jsou data získaná simulací trasy paprsku s konstantním teplotním gradientem $\nabla t = 2$ °C/m, proměnnou vzdáleností a zenitovým úhlem.

Tab. 13 Vliv vzdálenosti a zenitového úhlu

Zenitový úhel [gon]	Vzdálenost [m]					
	10	20	50	100	200	500
	Vertikální zdánlivý posun [mm]					
60	-0,07	-0,48	-2,81	-10,08	-33,00	-135,32
70	-0,07	-0,39	-2,45	-8,93	-30,53	-134,24
90	-0,08	-0,34	-2,13	-8,29	-31,21	-166,12
100	-0,09	-0,35	-2,16	-8,66	-34,62	-216,47
110	-0,09	-0,37	-2,31	-9,56	-41,35	-351,96
130	-0,15	-0,49	-3,12	-14,20	-85,36	*
140	-0,16	-0,57	-4,00	-19,97	-252,68	*

Na předchozích tabulkách je dobře viditelné, že je velmi důležité uvažovat vliv všech tří veličin. U dvou hodnot označených v tabulce * nejsou uvedena data, jelikož vypočítaná teplota z konstantního gradientu při iteraci klesla pod absolutní nulu $-273,15$ °C, což reálně nemůže nastat, a výpočet nelze dokončit.

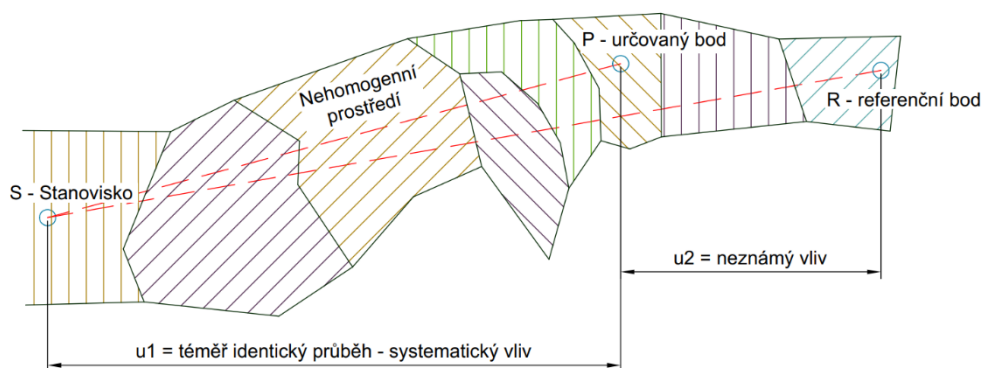


7.3 Výpočet vlivu refrakce pomocí diferenční metody

Pro poslední uvedený experiment (viz kapitola 8.8) byla také použita autorem „nově“ vymyšlená metoda, která byla navržena na základě výsledků předchozích experimentů. Základní myšlenkou je, že pokud není možné považovat přízemní úroveň atmosféry za homogenní (nebo alespoň diskrétním měřením teploty uchopitelnou), pak je potřeba se na ni dívat z pohledu celku – soustavy. Parametry atmosféry mohou být v rámci jednoho měřeného bodu vůči druhému měřenému bodu do jisté míry náhodné, ale celkově by se měla soustava (oblast) chovat o něco více stabilně (náhodné výkyvy vyskytující se ve velkém množství se mohou vzájemně vyrušit). Tuto domněnku potvrzují i experimenty, kde metody využívající teplotní gradient obecně určují významně vyšší zdánlivý posun, než který skutečně nastal = průchod skrze atmosféru je zřejmě tlumenější (respektive dochází zde pravděpodobně k samovolnému potlačování jednotlivých náhodných protisměrných vlivů). Pokud by se atmosféra chovala tímto způsobem, pak by se opakované měření realizované v krátkém časovém úseku a procházející tedy stejnou částí atmosféry mělo zatížit stejnou chybou vzniklou refrakcí. Také by mělo platit, že měření na různé body prováděné ve stejnou chvíli (v krátkém časovém intervalu) ve stejném směru (mající společnou část dráhy) bude zatíženo systematickým vlivem refrakce, ač nikoli numericky stejným. Obdobný přístup zaujímají i moderní GNSS stanice při diferenčním řešení výpočtu [65][66], kdy se očekává prakticky stejný (systematický) vliv na obě současně měřící stanice.

7.3.1 Základní matematický princip

Tato myšlenka může být zjednodušeně vysvětlena například na následujícím Obr. 29. Pokud bychom trigonometricky určovali výšku ze stanoviska (S) referenčního bodu (R), pro který budeme znát skutečnou výšku určenou například nivelací (H_{R_n}) a současně pro určovaný bod (P), který je v podobném směru a výšce nad terénem jako bod R, pak můžeme očekávat, že budou záměry procházet stejnou částí nehomogenního prostředí v jejím stejném stavu (čase), a tudíž i vliv refrakce na trigonometrické určení výšky (H_{R_t} a H_{P_t}) bude závislý – systematický alespoň v první části u_1 . Logicky lze předpokládat, že je vhodnější mít referenční bod ve stejné nebo o něco větší vzdálenosti než bod pozorovaný (obdobně jako u klasických geodetických metod). Díky tomu se na bod R „plnou měrou“ projeví vliv působící na bod P (pocházející z průchodu úsekem u_1). Navíc na bod R bude působit vliv průchodem druhého úseku u_2 .



Obr. 29 Schematický princip diferenční metody



Ze znalosti měřených výšek nivelací (bez refrakce) a trigonometricky (s vlivem refrakce) můžeme stanovit reálný vliv refrakce na bod R pro každou z etap

$$\Delta H_R = H_{R_n} - H_{R_t}. \quad (7.34)$$

Problémem zůstává, jak tento zdánlivý vertikální posun přepočítat na opravu výšky bodu P. Přesněji řečeno, jak fakticky oddělit vliv průchodu úsekem $u1$ a působící na bod P ($\Delta H_P = \Delta H_{u1}$) od vlivu úseku $u2$ (ΔH_{u2}). Vztah můžeme zjednodušeně zapsat jako přibližnou rovnost

$$\Delta H_P = \Delta H_{u1} \approx \Delta H_R - \Delta H_{u2}. \quad (7.35)$$

Teoreticky by bylo možné stanovení poměrového vlivu například za pomoci výpočtu DRPV či jiné metody, která dokáže vypočítat zdánlivý vertikální posun pro danou vzdálenost (zpětné určení průběžného průměrného gradientu ∇t). Tento přístup ovšem opět předpokládá, že se atmosféra chová obdobně v první i druhé části, což není prakticky pravda.

$$DRPV(\nabla t, u1 + u2, z_0, \dots) = \Delta H_R, \quad (7.36)$$

$$\Delta H_{u1} \approx \Delta H_R - DRPV(\nabla t, u1, z_0, \dots). \quad (7.37)$$

Tento postup tedy použít nemůžeme, jelikož předpokládá něco, co obecně neplatí. Obloukem se totiž vrací k mylné myšlence homogenní atmosféry a jejím vazbám.

Pro etapové nebo vícekrát opakované měření například při zátěžových zkouškách se naskytá elegantnější a numericky přesnější možnost řešení. V nulté etapě je možné určit přesnou výchozí výšku bodu P bez vlivu refrakce (H_{P_n} , například opět pomocí nivelace společně s bodem R). Bod R umístěný mimo zatěžovaný objekt (například za mostem) by byl vztažný a v průběhu zkoušky by neměnil svou výšku (obdobně jako jsou body orientační). Pak bychom pro nultou etapu získali reálný vliv refrakce jak pro bod R, tak pro bod P. Z této znalosti bychom určili vztah mezi nimi – poměr $q\Delta$

$$\Delta H_P = \Delta H_{u1} = H_{P_n} - H_{P_t}, \quad (7.38)$$

$$q\Delta = \frac{\Delta H_{P_0}}{\Delta H_{R_0}}. \quad (7.39)$$

Díky znalosti poměru mezi posuny na R a P pro nultou etapu by bylo v dalších etapách i možné již měřit pouze trigonometricky na oba body a posuny bodu P stejnou měrou přepočítávat

$$\Delta H_{P_i} = \frac{q\Delta}{\Delta H_{R_i}}. \quad (7.40)$$



Díky tomu můžeme určovat posuny v rámci zátěžové zkoušky pomocí trigonometrické metody, která je rychlejší, a zároveň získávat naměřená převýšení s potlačeným vlivem refrakce. Tento přístup je ovšem velmi citlivý na výraznější změny počasí v průběhu zátěžové zkoušky (v následujících etapách), jelikož je pravděpodobné, že by se změnil i samotný poměr $q\Delta$. Pro lepší věrohodnost by bylo vhodné zaměřit větší množství nultých (tréninkových) etap, a to ideálně v různé denní doby. To není vždy prakticky možné z časových či technologických důvodů. Nicméně v dnešní době, kdy je možné nechat totální stanici kontinuálně automaticky měřit osnovy směřů by neměl být problém zaměřit místo nulté etapy například soubor 20 etap v průběhu jedné hodiny před zátěžovou zkouškou a pak například další soubor po jejím skončení.

Z takového souboru je možné určit nejen poměr, ale i jeho případný vývoj v čase (funkci) a řešit pak výpočet formou extrapoláčního polynomu (v případě měření před začátek zkoušky) nebo interpolačního polynomu (v případě měření na začátku a na konci zkoušky)

$$q\Delta_i = f(i). \quad (7.41)$$

Zde ovšem do hry vstupuje problém s formou polynomu. Je jistě možné použít celou řadu náhradních křivek či polynomů různých řádů, a to vnáší do celého výpočtu lidský faktor a při použití příliš složité křivky může dojít k oscilaci mezi body datové sady. Proto bylo pro výpočty této úlohy rozhodnuto o využití strojového učení (neuronových sítí).

Jak je vidět z definovaných podmínek, tak pro klasické měření je v této metodě obecně příliš mnoho předpokladů (směr referenčního bodu, vzdálenost, ...), ačkoli při měření většího počtu referenčních bodů v různých směrech by tato metoda šla do jisté míry aplikovat i pro obecné měření či vytyčování.

Nejllepší uplatnění ovšem získá v případě etapového měření (například měření deformací při zátěžové zkoušce), kdy je možné si před začátkem pokusu (před etapovým měřením) rozvrhnout umístění orientačních, referenčních a pozorovaných bodů.

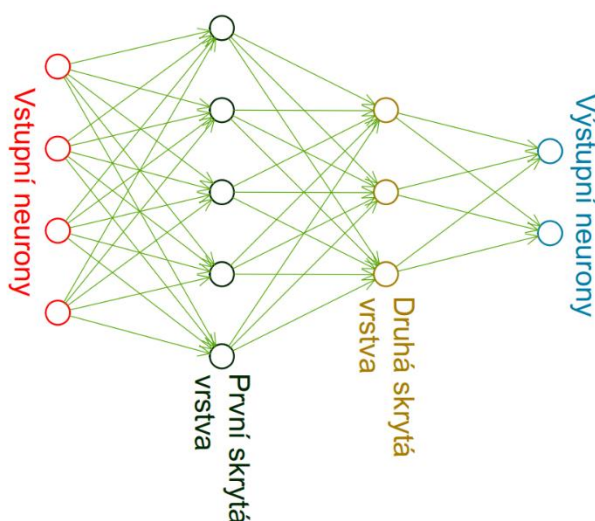
7.3.2 Strojové učení

Pod pojmem strojové učení se rozumí podmnožina umělé inteligence. Ty se zaměřují na určování matematických modelů řešících problémy, pro které není známa nebo není obecně platná funkční závislost. Nejsou tedy přímo naprogramovány, aby řešily jeden konkrétní problém konkrétním způsobem, ale dochází zde během procesu učení k určení optimálního modelu pro daný problém. Toho se docíljuje učením modelu formou úprav jeho koeficientů (vah) na základě principu zpětného výpočtu vah. Takový naučený model pak může sloužit k opakování daného výpočtu nad dalšími daty (za předpokladu, že je obecně platný). Obecně platí, že s vyšším množstvím dat (tréninkových) se zvyšuje věrohodnost a přesnost řešení daného problému.

Do kategorie strojového učení patří například hluboké učení a jeho nástroj umělé neuronové sítě. Více o obecném fungování a dělení strojového učení je dostupné například [67][68][69].



V poslední době jsou nejvíce používány umělé neuronové sítě (ANN), které jsou inspirovány biologickým mozkem, ve kterém dochází například k vyhodnocení vjemů a jejich rozklíčování na základě předchozí zkušenosti. Obdobně fungují umělé neuronové sítě, kde se neuronům také říká uzly a ty jsou shlukovány do vrstev. Přičemž počet vrstev může být různý. Jako vstupní vrstva se zjednodušeně rozumí vstupní data a výstupní vrstvou jsou pak požadované výsledky. Vrstvy mezi vstupní a výstupní vrstvou jsou nazývány skryté. Každý neuron ve vrstvě po obdržení dat z předchozí vrstvy tyto informace zpracuje (prakticky se jedná o určitou transformaci) a předá je dál neuronům v následující vrstvě. Nakonec se informace přenesou do koncových (výstupních) neuronů, které jsou v konečném důsledku modelovaným řešením daného problému. Na Obr. 30 je schematicky znázorněna neuronová síť se čtyřmi vstupními neurony, dvěma skrytými vrstvami (o 5 a 3 neuronech) a dvěma výstupními neurony. Obecně lze říci, že počet neuronů a počet vazeb mezi nimi výrazně zvyšuje pravděpodobnost rozpoznávání vzorů a přesnost řešení.

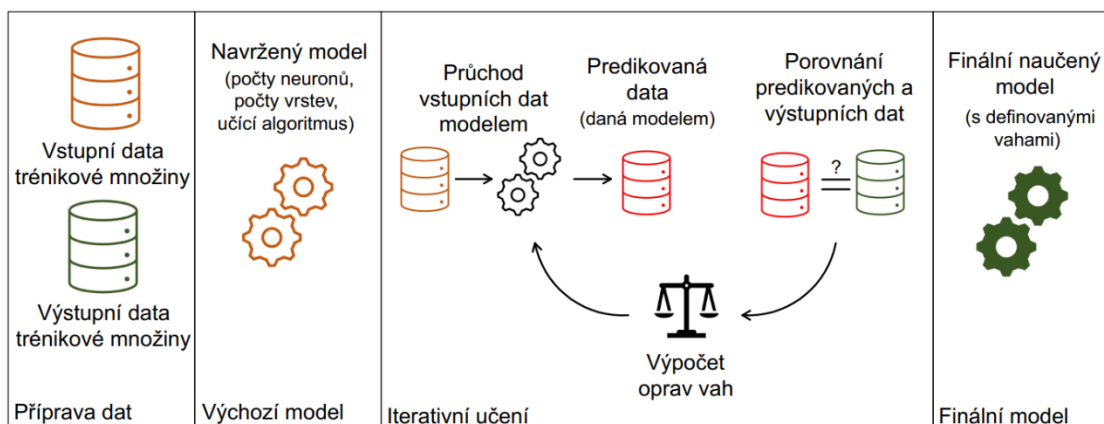


Obr. 30 Schéma neuronových sítí

Hluboké neuronové sítě jsou druhem umělých neuronových sítí s mnoha skrytými vrstvami. Existuje mnoho druhů hlubokých neuronových sítí, včetně konvolučních neuronových sítí (CNN), rekurentních neuronových sítí (RNN) a autoencoderů. Trénování hlubokých neuronových sítí obvykle vyžaduje velké množství dat a výpočetní výkon. Během trénování se váhy sítě upravují tak, aby minimalizovaly chybu mezi skutečnými a předpovězenými výstupy. Hluboké neuronové sítě se používají v mnoha oblastech, včetně rozpoznávání obrazu, přirozeného zpracování jazyka a expertních systémů.

7.3.2.1 Trénování neuronových sítí

Abychom mohli využít neuronovou síť k řešení problému, tak je potřeba ji nejprve na daný problém naučit (natrénovat). Obecně se rozlišuje učení s učitelem a bez učitele, přičemž rozdíl je v tom, zda po průchodu neuronovou sítí máme k dispozici výstupní hodnoty (výsledky). V rámci našeho případu bylo použito učení s učitelem a jeho schematický postup zachycuje Obr. 31.



Obr. 31 Schéma učení neuronových sítí s učitelem

V první fázi máme soubory trénovacích dat (zpravidla ve vektorech), které nám naplní vstupní neurony (počet neuronů = počet vektorů). Model se definuje pomocí počtu vrstev neuronů a počtu neuronů v každé z vrstev, přičemž v první vrstvě (vstupní) je definován počtem vstupních parametrů (vektorů na vstupu). Následující vrstvy mají různé počty neuronů, kdy je vhodné experimentálně ověřit jaký počet neuronů (i vrstev) je vhodný pro daný problém. Výstupní počet neuronů je opět definován počtem výstupních parametrů (vektorů).

V nulté iteraci učení jsou zpravidla do výchozího modelu vloženy náhodné konstanty (váhy). S těmito vahami dojde k výpočtu skrze neuronovou síť, na jejíž konci získáme predikovaná data, která jsou obecně odlišná od zadaných výstupních trénovacích dat. Z této chyby určíme korekce pro váhy (algoritmus zpětného šíření chyby) v modelu a celý proces zopakujeme. Iterace se zpravidla ukončí po dosažení požadované přesnosti, po dokončení předepsaného počtu iterací nebo pokud se přesnost přestane zvyšovat. Výsledkem je finální naučený model, který je schopný z dat vstupních vypočítat data výstupní se zbytkovou chybou (udávanou zpravidla jako RMS).

U takového naučeného modelu na trénovací data je vhodné jeho obecnou platnost ověřit pomocí testovacích dat. Je tedy prakticky nutné mít další sadu stejně strukturovaných dat (jak vstupních, tak výstupních vektorů) nevyužitých při trénování modelu, na které provedeme test. Testovací vstupní data necháme přepočítat skrze finální model na predikovaná data a ta porovnáme s výstupními testovacími daty. Pokud byly množiny učících i testovacích dat vhodně zvoleny a učení neuronové sítě proběhlo v pořádku, pak bychom měli dostat data numericky podobná datům výstupním. Obecně samozřejmě platí, že chyba (RMS) na datech trénovacích nabývá menších hodnot než chyba (RMS) na datech testovacích. V případě, že je chyba příliš velká, tak je možné připravit jiný vhodnější model neuronové sítě (změnit počet neuronů, vrstev, učící algoritmus, nebo počet opakování). Samozřejmě při nevhodně zvolené nebo příliš malé trénovací nebo testovací množině není možné model správně natrénovat a celý proces je nutné upravit.

Je potřeba také upozornit na problematiku „přeučení“ neuronové sítě, kdy je model extrémně přesně naučený na data trénovací a tím přestane být obecně platný – tedy selhává na testovací množině. To se stává v případech, kdy je příliš malá



(úzká) tréninková množina, nebo pokud použiji příliš velkou neuronovou síť (příliš mnoho vrstev a neuronů). Prakticky dojde k tomu, že neuronová síť „uloží“ do svých parametrů všechna výstupní data a tím určí výsledky, nicméně nezjistí obecnější vzor. Zjednodušeně řečeno platí, že s čím menší tréninkovou množinou pracuji, tím menší bych měl zvolit neuronovou síť. To samozřejmě v případě řešení složitějších problémů může způsobit selhání výpočtu, respektive neřešitelnost daného problému (neuronovou síť není možné kvalitně natrénovat).

7.3.2.2 Nutné úpravy dat pro potřebu výpočtů

Před samotným výpočtem modelu neuronové sítě bylo potřeba provést numerické úpravy vstupních a výstupních dat pro zajištění lepšího výsledku. Zejména se jedná o normalizaci na rozsah $\langle 0, 1 \rangle$ každé datové sady (vektoru). Tím se v našem případě rozumí například přepočítání teploty na daný rozsah. Další úpravou bylo po rozdělení datových sad na trénovací a testovací množinu zamíchání pořadí v rámci trénovací množiny.

Normalizace datových sad se provádí standardně na velikost $\langle 0, 1 \rangle$, přičemž se pro každou datovou sadu (vstupní/výstupní neuron) provádí zvlášť. V našem případě to znamenalo například normování měřené teploty, tlaku, času měření anebo dosaženého zdánlivého vertikálního posunu. V následující rovnici je uveden vztah pro takto normovanou teplotu \hat{t}_i ze souboru teplot $t = \{t_1, t_2, \dots, t_i, \dots\}$

$$\hat{t}_i = \frac{t_i - \min(t)}{\max(t) - \min(t)}. \quad (7.42)$$

Po rozdělení množiny na trénovací a testovací (pro variace výpočtů byly meze zvoleny různým způsobem, aby lépe vyhovovaly danému testování) došlo ke znáhodnění pořadí. Pro neuronové síť je vhodnější, pokud nejsou datové sady seřazené (například dle času měření), jelikož existuje mezi jednotlivými následujícími prvky souboru závislost (posloupnost), a to negativně ovlivňuje učení modelu (především rychlost učení). Pro tento účel byl použit nástroj „gsort“ z knihovny programu Scilab. Princip znáhodnění je ukázán v Tab. 14.



Tab. 14 Znáhodnění dat

Původní seřazená data				Znáhodněná data		
Pořadí ve vektoru	Teplota	Tlak		Pořadí ve vektoru	Teplota	Tlak
1	t_1	p_1	→	1	t_5	p_5
2	t_2	p_2		2	t_4	p_4
3	t_3	p_3		3	t_8	p_8
4	t_4	p_4		4	t_{10}	p_{10}
5	t_5	p_5		5	t_1	p_1
6	t_6	p_6		6	t_3	p_3
7	t_7	p_7		7	t_6	p_6
8	t_8	p_8		8	t_9	p_9
9	t_9	p_9		9	t_7	p_7
10	t_{10}	p_{10}		10	t_2	p_2

Po dokončení trénování byla pro potřeby vyhodnocení data opětovně srovnána do původního pořadí.



8 Měřické experimenty

Použitím výše zmíněných čidel, loggerů a stínících konstrukcí byla provedena řada experimentů, jejichž cílem bylo podchycení vývoje atmosféry zejména ve svislém směru. Tato kapitola sumarizuje vybrané experimenty a jejich výsledky. Kromě těchto experimentů byla provedena řada kalibračních měření, měření ověřujících přesnost čidel a použitelnost konstrukce. Některé experimenty byly provedeny vícekrát, pak je zde zpravidla uveden jen jeden z nich z důvodu rozsahu práce. Stejně tak bylo provedeno několik experimentů, které měly za úkoly prokázat či vyvrátit vazby teploty či zdánlivého vertikálního posunu na další proměnné (například rychlost větru). Vzhledem k tomu, že tyto vazby nebyly prokázány a nebyly tedy důležité pro směřování výzkumu a celkové závěry, tak zde také nejsou popsány.

Jelikož byl celý výzkum zaměřen na určení konkrétních hodnot parametrů atmosféry a ověření či vyvrácení jistých předpokladů (chování teplot a teplotních gradientů, vertikální rozvrstvení atmosféry, určení vlivu refrakce...), tak nebyl zpočátku zřejmý konkrétní cíl výzkumu. Proto jsou experimenty víceméně navazující, přičemž každý další prohloubil znalosti dané problematiky a vytvořil tak podklad pro experiment následující. Experimenty jsou v této kapitole řazeny chronologicky tak, aby bylo možné sledovat postupný směr bádání a důvody úpravy použitých pomůcek, metodiky či návržení navazujících experimentů. Každý experiment je ukončen shrnutím poznatků, které slouží jako výchozí pro experiment následující.

8.1 První experimenty – termočláňková čidla

Během prvního roku byla prováděna měření s termočláňkovými čidly, kterými již katedra disponovala. Ačkoli se v počátcích zdály jejich vlastnosti dostačující, tak jak dokázaly následující experimenty, bylo třeba provést lepší volbu čidel a úpravu aparatury celkově.

8.1.1 Nastavení experimentu

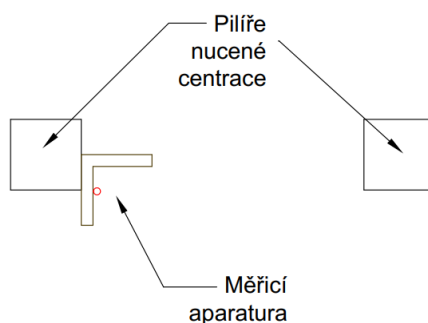
První pokusy byly realizovány na střeše budovy B–10 NP, Fakulty stavební ČVUT v Praze. Hlavním důvodem byla bezpečnost měřicí aparatury, která zde měla být ponechána bez dozoru po dobu měření. Dalším důvodem byl předpoklad, že na střeše nebude měření příliš ovlivněno dalšími vlivy (konstrukce byla vhodně umístěna mimo vývody klimatizace a jiné vzduchotechniky).

Pro tyto experimenty byla použita termočláňková čidla typu *K* (kapitola 6.1.2) umístěná na konstrukci z nivelačních latí (kapitola 6.2.1) se záznamníkem LUTRON (kapitola 0). Experiment byl koncipován jako půldenní až denní měření teploty s intervalem záznamu 10 s. Konstrukce byla upevněna k pilíři nucené centrace tak, aby byla čidla izolována od pilíře pomocí konstrukce (viz Obr. 32). Dále bylo nutné z důvodu pohybu slunce po nebi pravidelně otáčet lať okolo pilíře a tím zaručit, že nedojde k přímé expozici čidel slunečnímu záření. Měřeno bylo především ve slunečných dnech, kdy nehrozily srážky, které by mohly poškodit aparaturu.



Slunce

Střecha budovy FSv



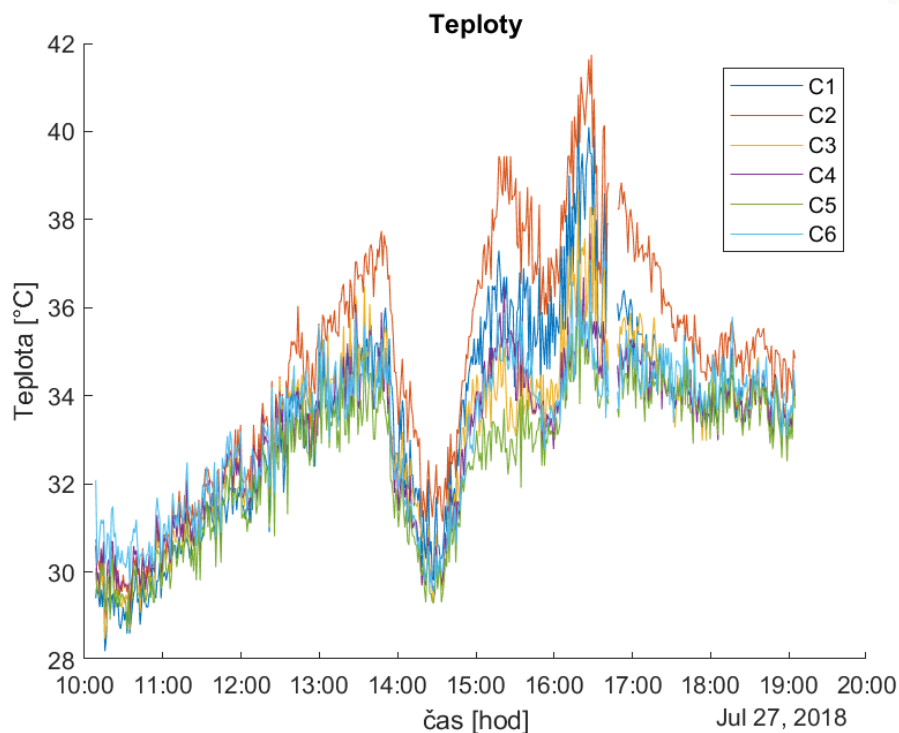
Obr. 32 Rozmístění pomůcek na střeše

Pro zvýšení přesnosti výsledků byla provedena kalibrace čidel vůči sobě (podrobněji v kapitole 8.1.3). Naměřené hodnoty byly opraveny o kalibrační konstanty a z těchto údajů byly vypočítány rozdíly a vybrané teplotní gradienty.

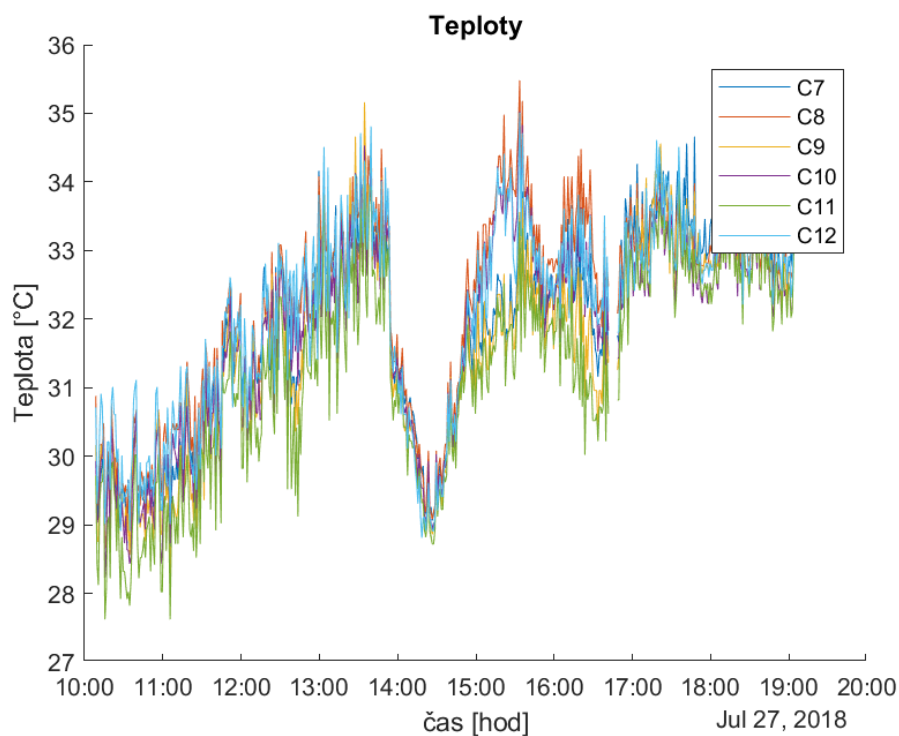
8.1.2 Ukázkové měření 27. 7. 2018

V následujících odstavcích je prezentováno konkrétní měření ze dne 27. 7. 2018. Během dne bylo polojasno, a kromě cca 12 minut od 16:42, kdy proběhlo otočení latě okolo pilíře, bylo měření kontinuální. Čidlo č.1 bylo na konstrukci umístěno ve výšce 0,10 m nad povrchem a následující čidla byla v pravidelném rozestupu 0,35 m až do čidla č.12 ve výšce 3,95 m.

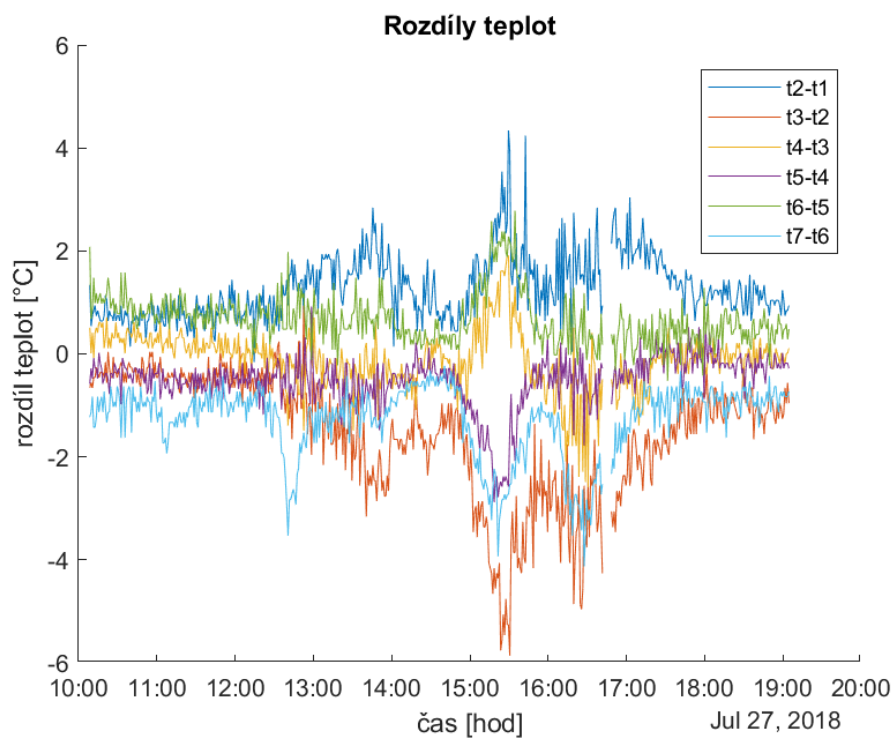
Výsledné teploty (viz zjednodušené grafy Obr. 33 a Obr. 34), určené rozdíly teplot (Obr. 35, Obr. 36) a gradienty (Obr. 37) poukazují na kolísání teplot v řádu stupňů, což lze spíše považovat za chyby měření než praktické výsledky. Tyto výsledky nepůsobí přesvědčivě, ale i zde je patrný jistý trend. Tento experiment (a jemu podobné) vedly k hledání přesnějších čidel a tím dosažení věrohodnějších výsledků.



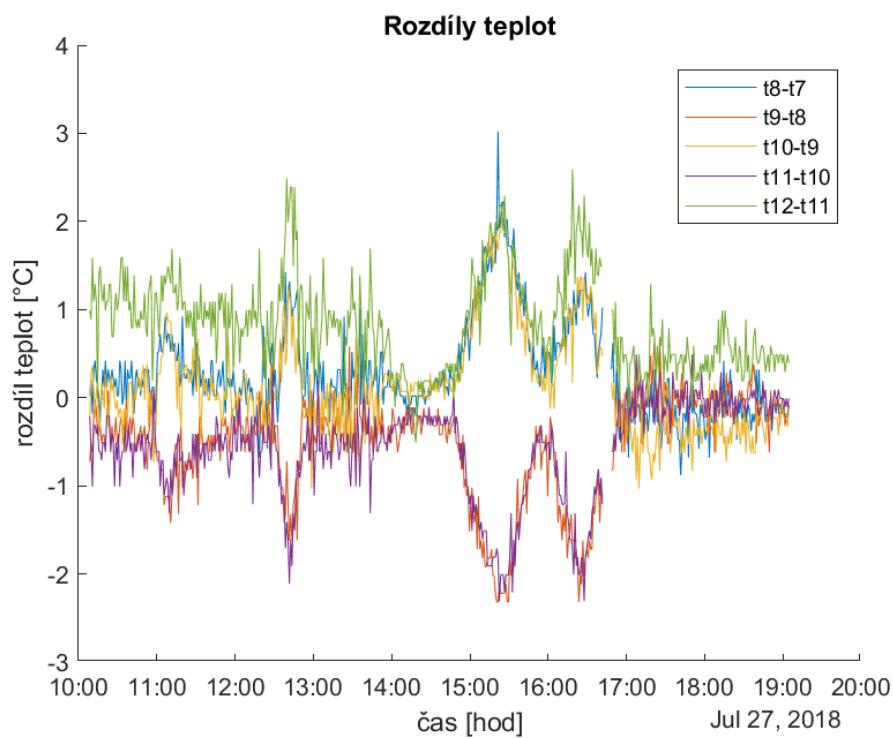
Obr. 33 Naměřené teploty (0,10 m až 1,85 m)



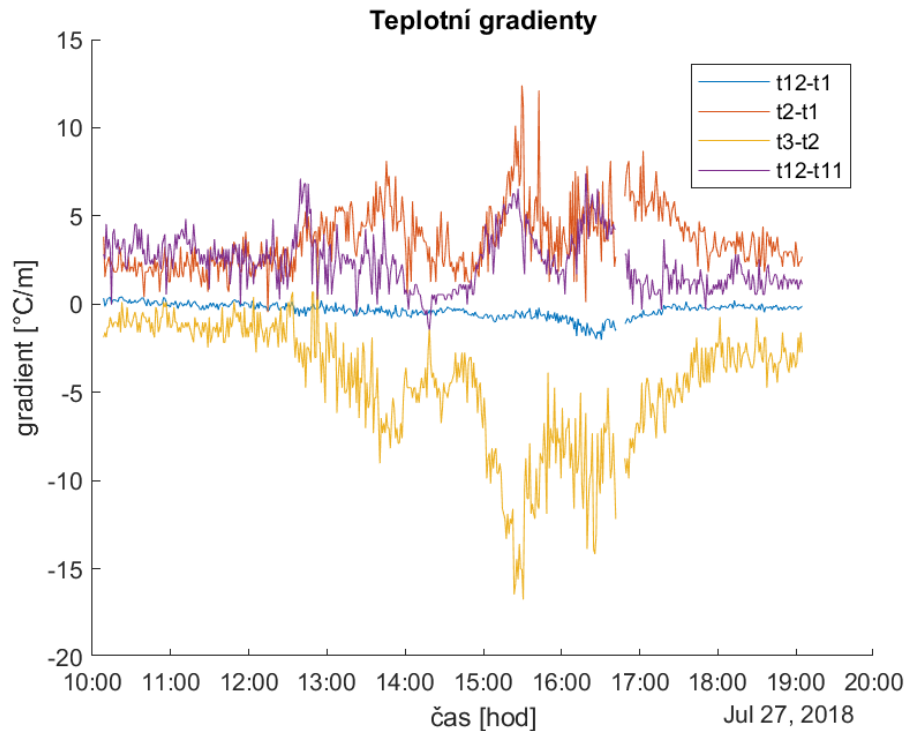
Obr. 34 Naměřené teploty (2,20 m až 3,95 m)



Obr. 35 Rozdíly teplot 1



Obr. 36 Rozdíly teplot 2



Obr. 37 Vybrané teplotní gradienty

8.1.3 Kalibrace termočláňkových čidel

Kalibrace byla provedena pomocí termokrabice z polystyrenu určené pro převážení pokrmů, ve které se teplota ustálí na přibližně stejné hodnotě. Do této krabice byla vložena čidla i logger a bylo měřeno po dobu několika hodin. Prvních několik desítek minut nebylo pro výpočet kalibrace uvažováno z důvodu ustalování teploty v krabici a temperování zařízení. Přibližná teplota při kalibraci činila 30 °C.

Naměřená data z 12 čidel byla následně zpracována a kalibrována na čidlo č. 1 (prakticky to není důležité, protože ve výzkumu nás zajímají rozdíly a gradienty mezi čidly). Výsledné hodnoty jsou sumarizovány v Tab. 15.

Tab. 15 Kalibrace termočláňkových čidel

Čidlo	Č. 2	Č. 3	Č. 4	Č. 5	Č. 6	Č. 7	Č. 8	Č. 9	Č. 10	Č. 11	Č. 12
Průměrná oprava [°C]	0,04	0,18	0,19	-1,19	0,89	0,26	0,78	0,56	0,73	0,32	0,51
Min [°C]	-0,10	0,00	0,10	-1,40	0,80	0,10	0,60	0,40	0,60	0,20	0,40
Max [°C]	0,20	0,30	0,30	-1,10	1,00	0,40	0,90	0,60	0,80	0,40	0,60
Směr. odch. výběru [°C]	0,073	0,083	0,047	0,066	0,048	0,058	0,060	0,063	0,061	0,073	0,060

Výsledky vypadají na první pohled dobře, ačkoli jsou chyby u čidla č. 5 poměrně vysoké (1,2 °C). Směrodatná odchylka je u všech čidel do 0,1 °C.



8.1.3.1 Druhá kalibrace se změnou teploty

Po několika experimentech byla kalibrace zopakována se zapojením vlivu změny teploty na kalibrační údaje. Změny bylo dosaženo umístěním sklenice s ledem do kalibrační krabice. Počáteční teplota, před vložením ledu, se pohybovala okolo 25 °C a koncová teplota, při vloženém ledu, činila 20 °C. Výsledné kalibrační opravy jsou v Tab. 16. Je zde vypsán především průměr, průměr s použitím měření bez ledu a průměr vypočítaný z měření s vloženým ledem.

Tab. 16 Kalibrace termočláňkových čidel – změna teploty

Čidlo	Č. 2	Č. 3	Č. 4	Č. 5	Č. 6	Č. 7	Č. 8	Č. 9	Č. 10	Č. 11	Č. 12
Průměrná oprava [°C]	-0,07	-0,10	-0,08	-1,45	0,52	-0,04	0,45	0,38	0,35	0,04	0,29
Max [°C]	0,10	0,10	0,10	-1,30	0,70	0,20	0,80	0,70	0,80	0,30	0,60
Min [°C]	-0,40	-0,50	-0,50	-1,90	0,00	-0,50	-0,30	-0,30	-0,50	-0,80	-0,40
Opr. teplo [°C]	0,01	0,03	0,04	-1,35	0,64	0,10	0,67	0,58	0,63	0,24	0,45
Opr. chlad [°C]	-0,26	-0,39	-0,35	-1,67	0,25	-0,38	-0,07	-0,08	-0,29	-0,44	-0,07

Z tabulky je zřejmé, že i poměrně malá změna teploty (5 °C) má velmi významný vliv na velikost kalibrační konstanty v řádu desetin stupně.

8.1.3.2 Test stability přesnosti měření

V závislosti na předchozích experimentech proběhla ještě jedna zkouška přesnosti čidel a především test schopnosti praktického určení kalibračních konstant.

Nejprve byla čidla umístěna v zavřené termokrabici ve stabilním prostředí. Následně, po ustálení teploty na cca 19 °C, byla krabice otevřena a čidla byla vystavena proudění vzduchu – kolísání teploty zhruba mezi 15 až 19 °C. Výsledné koeficienty opravy pro stabilní prostředí a otevřenou krabici (kolísání teplot) včetně jejich směrodatných odchylek jsou uvedeny v Tab. 17.

Tab. 17 Kalibrace termočláňkových čidel – kolísání teploty

Čidlo	Č. 2	Č. 3	Č. 4	Č. 5	Č. 6	Č. 7	Č. 8	Č. 9	Č. 10	Č. 11	Č. 12
Stabilní prům. opr. [°C]	-0,26	0,08	0,05	-1,03	0,49	0,25	0,56	0,74	0,58	0,15	0,41
Směr. odch. výběru [°C]	0,08	0,06	0,06	0,11	0,11	0,07	0,07	0,07	0,07	0,06	0,09
Kolísavá prům. opr. [°C]	-0,05	-0,05	0,02	-1,35	0,62	0,19	0,76	0,75	0,79	0,37	0,53
Směr. odch. výběru [°C]	0,29	0,39	0,39	0,33	0,38	0,44	0,39	0,36	0,34	0,33	0,34

Z tabulky je jasně vidět, že stanovení nějakého opravného koeficientu je prakticky neproveditelné. Směrodatná odchylka vypočítaných oprav při kolísání teplot se pohybuje okolo 0,35 °C. Tato hodnota je způsobena pouze kolísáním teploty v rozsahu asi 4 °C. Použití čidel v praxi, kde se teploty během dne pohybují v řádu



desítek stupňů, je tedy nedostačující. Nestabilita čidel byla dalším důvodem k hledání přesnější a stabilnější alternativy.

8.1.4 Závěry experimentu

Zpětně vnímám tyto experimenty jako vstupní pokusy pro základní seznámení s problematikou měření teploty a refrakce obecně. V zásadě se jednalo o prokázání nevhodnosti daného vybavení pro potřeby určování vlivu refrakce. Zároveň se však podařilo získat data, ač nepřesná, která dobře dokazují nestabilitu atmosféry v pozorovaném rozsahu. Fluktuační teploty je z části dána nepřesností čidel, ale prokazuje možnost změny teploty v krátkém časovém úseku v řádu jednotek stupňů Celsia. Z experimentů vyplývá, že pro dosažení věrohodnějšího nebo přesnějšího určení teploty je potřeba použít přesnějších čidel a vhodnějších pomůcek obecně.

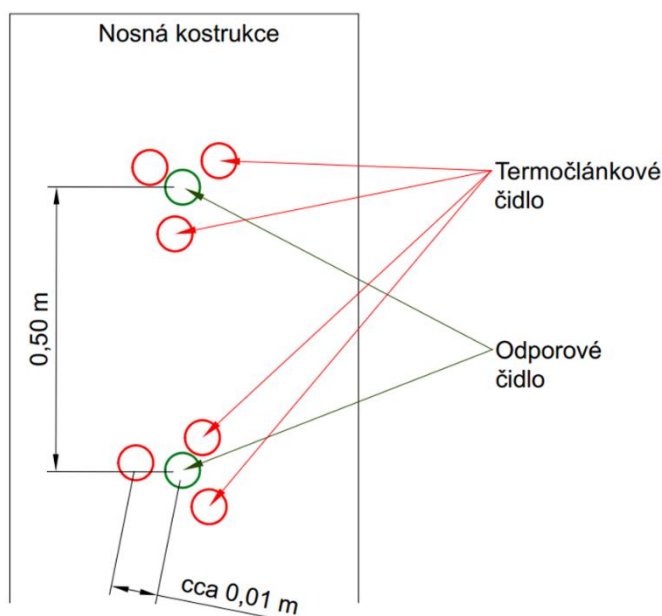
V následujícím experimentu dochází k první aplikaci odporových čidel a jejich porovnání s dosavadní metodou měření teploty termočláňkovými čidly.

8.2 Kombinační měření

Po pořízení odporových senzorů TG8-40 (kapitola 6.1.1.1) a sestavení nové konstrukce (kapitola 6.2.2) bylo provedeno několik měření, ve kterých byla použita společně čidla termočláňková (kapitola 6.1.2) i odporová. Cílem experimentů bylo určit, zda není možné najít aktuální opravu termočláňkového čidla pro zpřesnění měření pomocí souběžného měření odporovými čidly. Výchozí „správnou“ teplotou během experimentu byla teplota určená odporovými čidly, která mají přesnost cca 0,15 °C. V praxi by se jednalo o kalibraci v reálném čase.

8.2.1 Nastavení experimentu

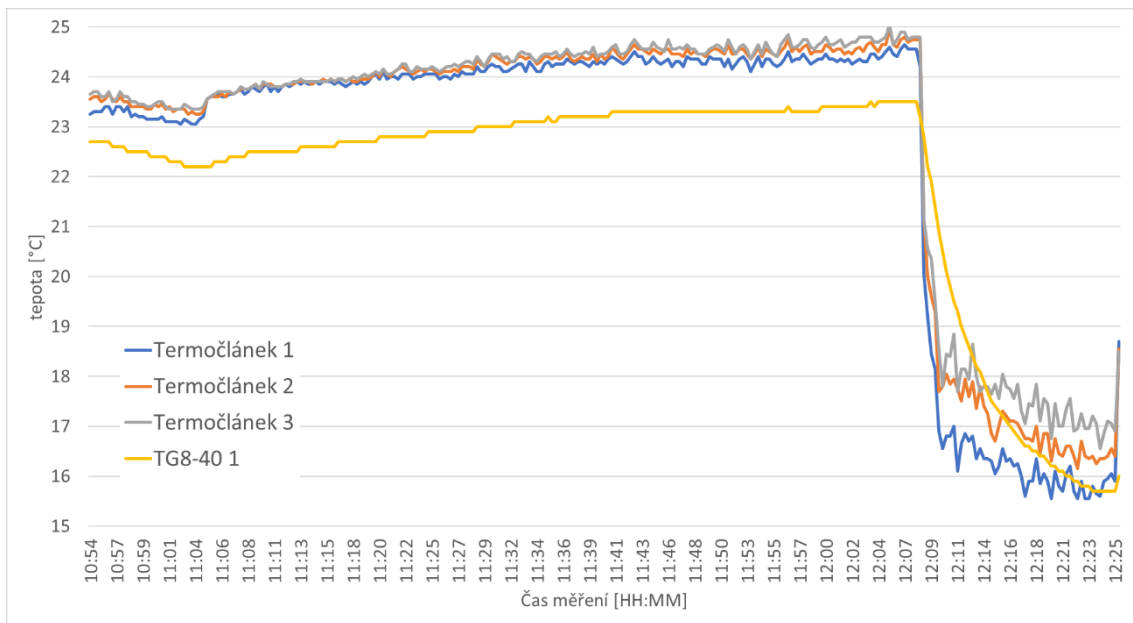
Pokusy se odehrávaly na střeše budovy a v prostorách areálu FSv ČVUT. Na konstrukci byla osazena po cca 0,50 m trojice termočláňkových čidel a jeden odporový senzor TG8-40 (tato čtveřice byla v těsné blízkosti, viz Obr. 38). Měření probíhalo v polovině listopadu 2018 a trvalo od 12:45 do 16:00.



Obr. 38 Rozmístění čidel pro porovnání přesnosti a odezvy

8.2.2 Test rychlosti odezvy zapouzdřených čidel

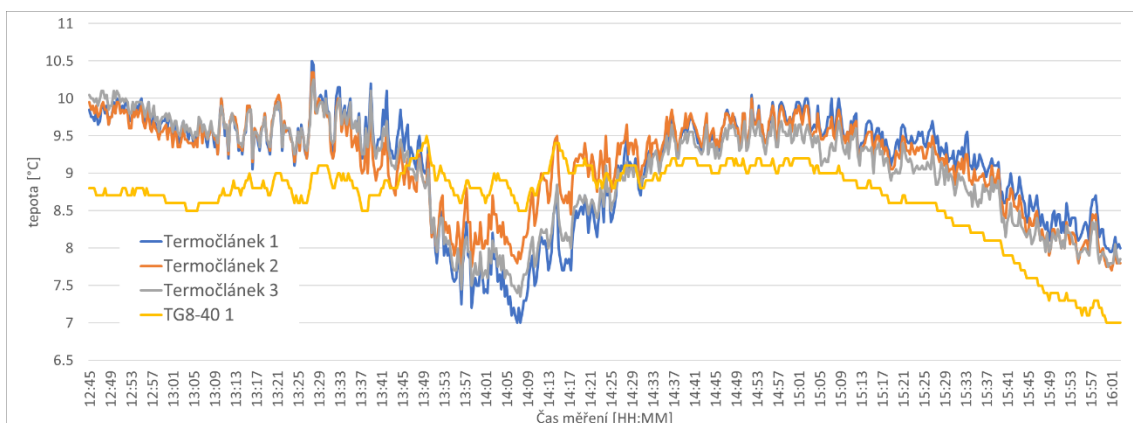
Před začátkem měření byl uskutečněn jednoduchý test rychlosti odezvy nových odporových čidel prováděný obdobným způsobem jako kalibrace v kapitole 8.1.3. Výsledný stav je zobrazen na Obr. 39. Je zde dobře patrný vliv systematické chyby čidel termočláňkových v hodnotě cca 2 °C. Nicméně po otevření krabice se projevil nedostatek u zapouzdřených čidel. Ochranné kovové pouzdro sice čidla účinně chrání, ale zamezuje volnému přístupu média (vzduchu), a tím zpomaluje změnu teploty přímo na čidle. To má za následek opoždění čidla odporového oproti čidlům termočláňkovým. I přes zjevné zpoždění bylo zvoleno odporové čidlo za vhodnější, a to zejména díky prokazatelně lepší přesnosti i stabilitě. Skoková změna v řádu vyšších jednotek stupňů navíc v praxi není obvyklá, jak dokazují předchozí experimenty.



Obr. 39 Test rychlosti odezvy odporových senzorů TG8-40

8.2.3 Měření

Výraznou překážkou se také ukázala synchronizace hodin jednotlivých loggerů a celková časová náročnost na přípravu měření. Ze současného měření čidel bylo možné sestavit graf Obr. 40 zobrazující chování jedné ze čtveřice čidel. Opět je zde dobře poznatelná systematická chyba čidel termočlánekových dosahující hodnoty okolo 1,2 °C. Mimo jiné je zde vidět propad teploty zaznamenaný všemi termočlánekovými čidly v době okolo 13:50 až 14:25, který není téměř znatelný na čidlo odporové. Je to zajímavá skutečnost, která spíše poukazuje na změnu systematické chyby u čidel termočlánekových než na nepřesnost odporového čidla. V případě opoždění odporového čidla by došlo alespoň k nějaké reakci, jak je dobře vidět u klesající tendence teploty v odpoledních hodinách.

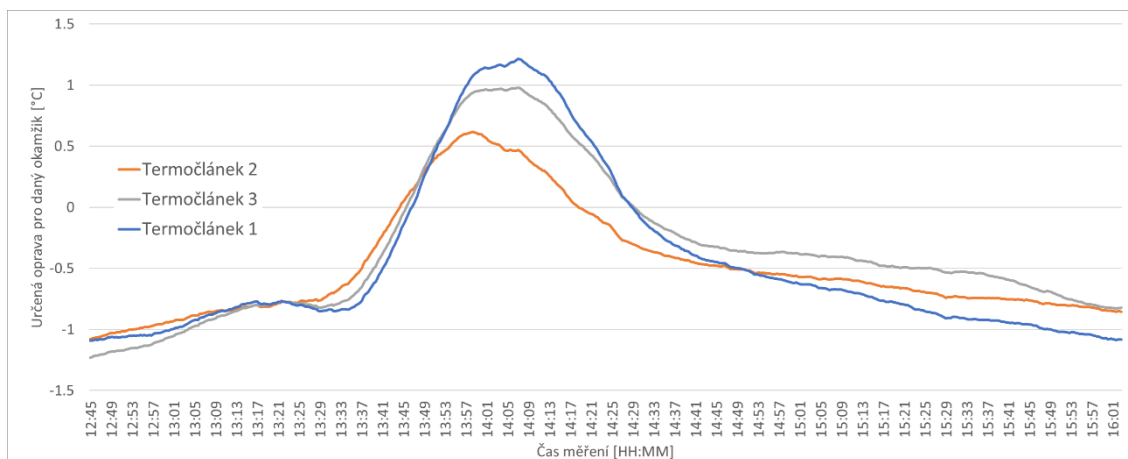


Obr. 40 Ukázka měření teploty před kalibrací



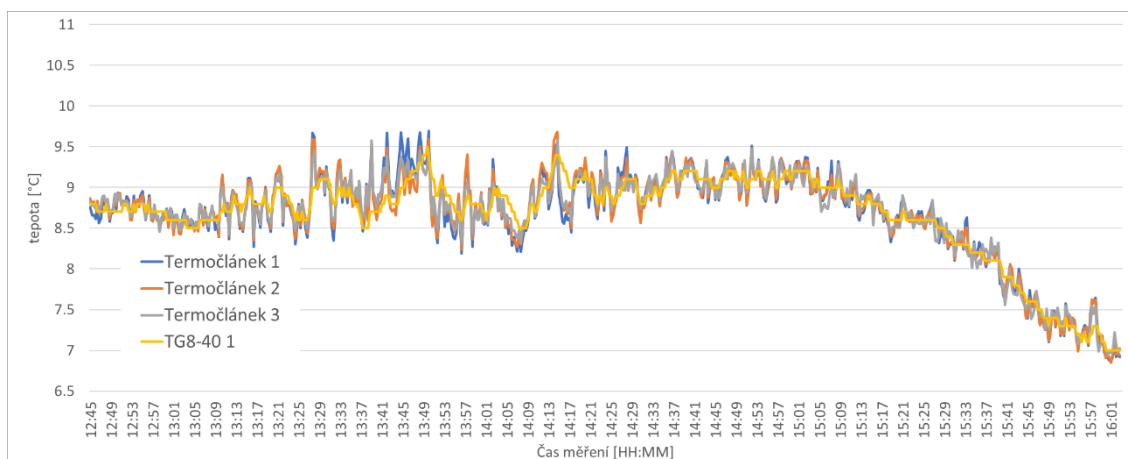
8.2.4 Výsledky

Výsledkem experimentů byl výpočet průměrných oprav termočlávkových čidel od referenčního odporového čidla. Pro výpočet této opravy byl zvolen prostý aritmetický průměr z měření 10 minut před a 10 minut po daném okamžiku. Tento přístup byl zvolen především s ohledem na odezvu zapouzdřených senzorů (v kratším intervalu by mohlo docházet k zavádění chyb). Na Obr. 41 jsou zobrazeny vypočítané opravy pro daný okamžik měření. Je jasné, že použití konstantní opravy by bylo zcela nevhodné.



Obr. 41 Vypočítané kalibrační hodnoty pro daný okamžik měření

V grafu Obr. 42 jsou prezentována data po zavedení oprav. Výsledky tohoto experimentu nám dokazují, že je sice možné touto metodou dosáhnout lepších výsledků, nicméně reálná přesnost drátkových čidel je poměrně nízká a celkově jejich spolehlivost není dostatečná pro potřeby tohoto výzkumu. Dále vzhledem k náročnosti přípravy měření a post-processingu bylo od snahy zapojit termočlávková čidla do výzkumu upuštěno a místo toho byla navržena a pořízena lepší varianta v podobě čidel TR097C (kapitola 6.1.1.2), která jsou používána v následujících experimentech.



Obr. 42 Ukázka teplot po zavedení kalibračních hodnot



8.2.5 Závěry experimentu

Z předchozích údajů vyplývá, že termočláňková čidla nemají dostatečnou přesnost nebo přesněji nemají dostatečně stabilní přesnost pro určování teploty použitelné pro výpočet vlivu refrakce. Proto bylo od těchto čidel upuštěno a nadále byla používány jen čidla TG8-40 a jejich vhodnější obdoba v podobě čidel TR097C, která jsou zalita a jejich rychlost odezvy je výrazně vyšší.

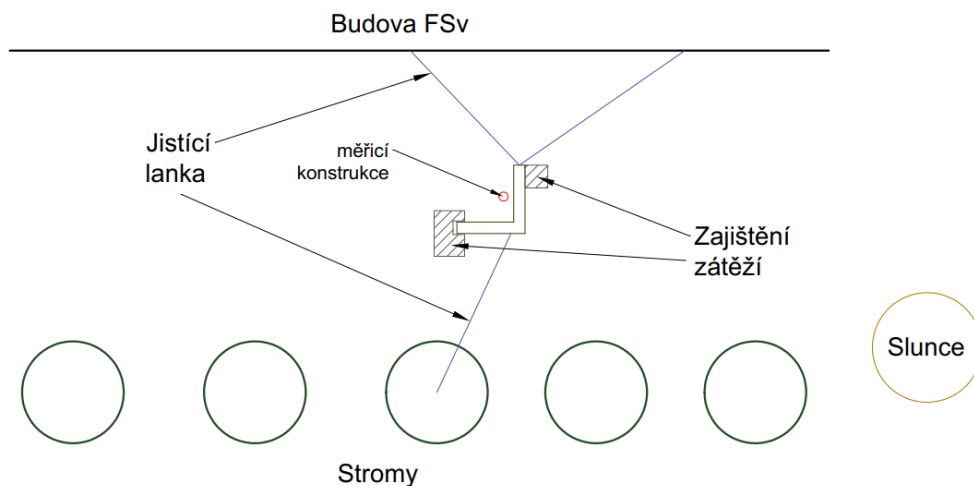
8.3 Periodické roční měření

Bezesporu zajímavou otázkou je, jak se bude lišit teplota (a případně její vliv na měření) v průběhu roku. Z toho důvodu byl navržen experiment mající za cíl měřit vývoj teplot v různou roční dobu a z těchto údajů zpětně odvozovat případný vliv refrakce. Za vhodný naplánovaný interval mezi jednotlivými měřeními bylo zvoleno 14 dní, ovšem s ohledem na případné nevhodné počasí nebyl tento interval vždy zcela dodržen. Měření uskutečněné například v dešti by nebylo možné kvalitně porovnat s měřeními před 14 dny provedeným za slunného počasí.

8.3.1 Nastavení experimentu

Od ledna 2019 bylo pravidelně měřeno v zadní části areálu ČVUT (z důvodu bezpečnosti, viz Obr. 17) vždy po cca 15 dnech. Měření probíhalo formou 24hodinového sběru dat ze čtyř odporových čidel PT1000 typu sondy TG8-40 (viz 6.1.1.1) nebo na zakázku vyrobených TR097C (viz 6.1.1.2). Čidla byla umístěna ve výškách 0,50; 1,00; 1,50 a 1,90 m nad zemí ve stínící konstrukci (kapitola 6.2.2). Odečítání probíhalo automaticky po 20 sekundách (nižší interval 10 s nebyl zvolen, jelikož by bylo nutné minimálně jednou během měření stáhnout data).

Konstrukce byla zajištěna proti pádu pomocí padákových lanek ke třem pevným bodům a pomocí zátěží v její spodní části. Měření bylo ztíženo tím, že bylo nutné konstrukci otáčet tak, aby na čidla nesvítilo slunce. Na Obr. 43 je zobrazen náčrt situace.



Obr. 43 Rozmístění pomůcek v areálu FSv



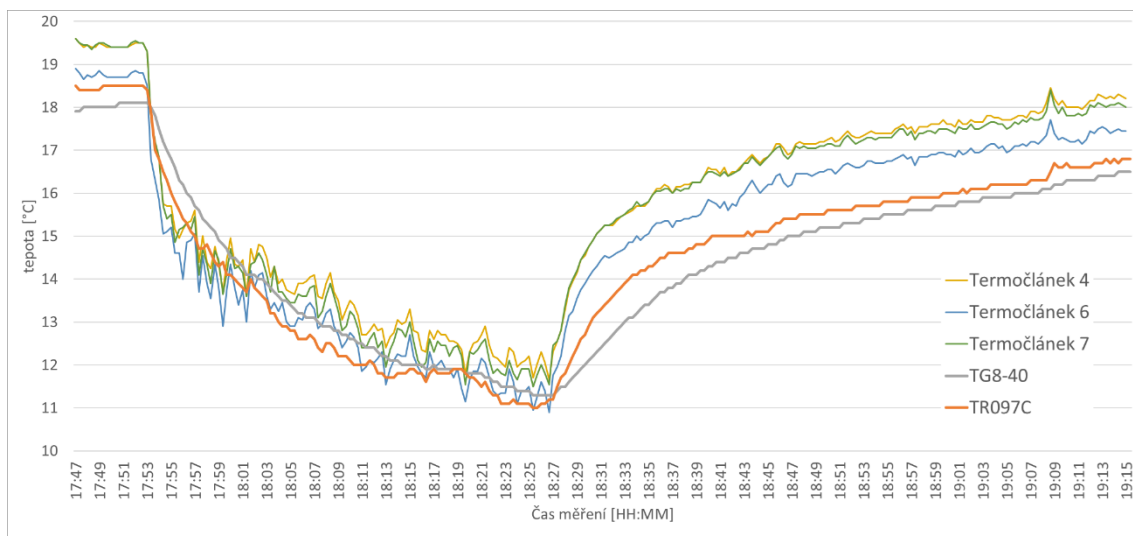
Výsledná data byla opravena o vliv odporu vodiče, nejprve ručně (post-processing) a později automaticky se zadáním parametrů do software Comet Vision (kapitola 6.3.4).

Před samotným měřením byl proveden ještě test nově použitých čidel TR097C zaměřující se na rychlost jejich odezvy a přesnost.

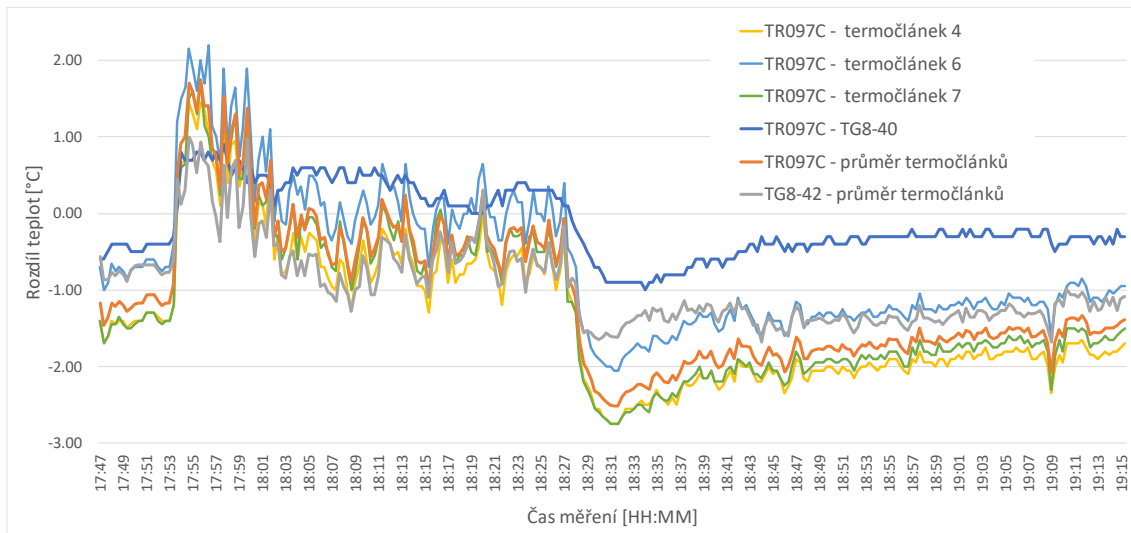
8.3.2 Test rychlosti odezvy zalitých čidel

Obdobně jako u testu zapouzdřeného čidla v kapitole 8.2.2 bylo i pro zalité čidlo TR097C provedeno testování s cílem zjistit schopnost reagovat na změnu teploty.

Výsledek experimentu ve formě surového měření je znázorněn na Obr. 44 a na Obr. 45 jsou znázorněny rozdíly měřené teploty různými čidly. Opět zde vidíme systematickou chybu čidel termočlánekových a drobný rozdíl mezi zalitým a zapouzdřeným čidlem odporovým. Po skokové změně teploty (otevření krabice) můžeme vidět, že zalité čidlo reaguje výrazně rychleji než čidlo zapouzdřené. Nicméně termočláneková čidla reagují stále nejrychleji. Vzhledem k přesnosti termočlánekových čidel 4, 6 a 7 (která vyšla z předešlých pokusů jako nejpřesnější) je nelze považovat za referenční v pravém slova smyslu. Spíš jsou zde pro přibližnou představu o reálné dosažené změně teploty.



Obr. 44 Test čidla TR097C



Obr. 45 Rozdíly teplot měřené jednotlivými čidly oproti čidlu TR097C

Z grafů můžeme vyčíst, že poměrně rychle dochází k vyrovnání určované teploty zalitým čidlem oproti termočlánekovým čidlům. Pro naše účely se zdají zalitá čidla z daného výběru nejlepší volbou, jelikož jejich přesnost a spolehlivost je výrazně vyšší než u termočláneků a zároveň jejich odezva je prakticky dostatečná (při uvážení reálné změny teploty za jednotku času).

8.3.3 Měření

Měření byla realizována nad pravidelně sekaným travnatým porostem. Vyjma termínů od 1. 4. 2020 do 20. 5. 2020 byla konstrukce většinu dne ve stínu. Ve zmíněném intervalu bylo měřeno na slunném prostranství s celodenním slunečním osvitem.

Z důvodu rozsahu nebudou v této práci prezentována všechna měření ale pouze vybraná z různých měsíců. Tato naměřená data jsou prezentována formou grafů teplot – graf celodenního vývoje teploty a grafu vertikálního teplotního gradientu.

Měření bylo provedeno celkem více než 40 a z nich byla vybrána ta, která dohromady reprezentují co možná nejlepší popis celého roku a zároveň jsou vzájemně komparovatelná (při měření panovaly podobné podmínky).

V Tab. 18 jsou uvedeny doplňkové informace pro lokalitu Prahy v době měření. Primárně jde o data popisující atmosféru jako je tlak, vlhkost a dešťové srážky. Dále jsou zde uvedeny časy východu a západu slunce, které jsou také vyznačeny v grafech pomocí šipek. Data byla získána z online přístupných archivů počasí [70].



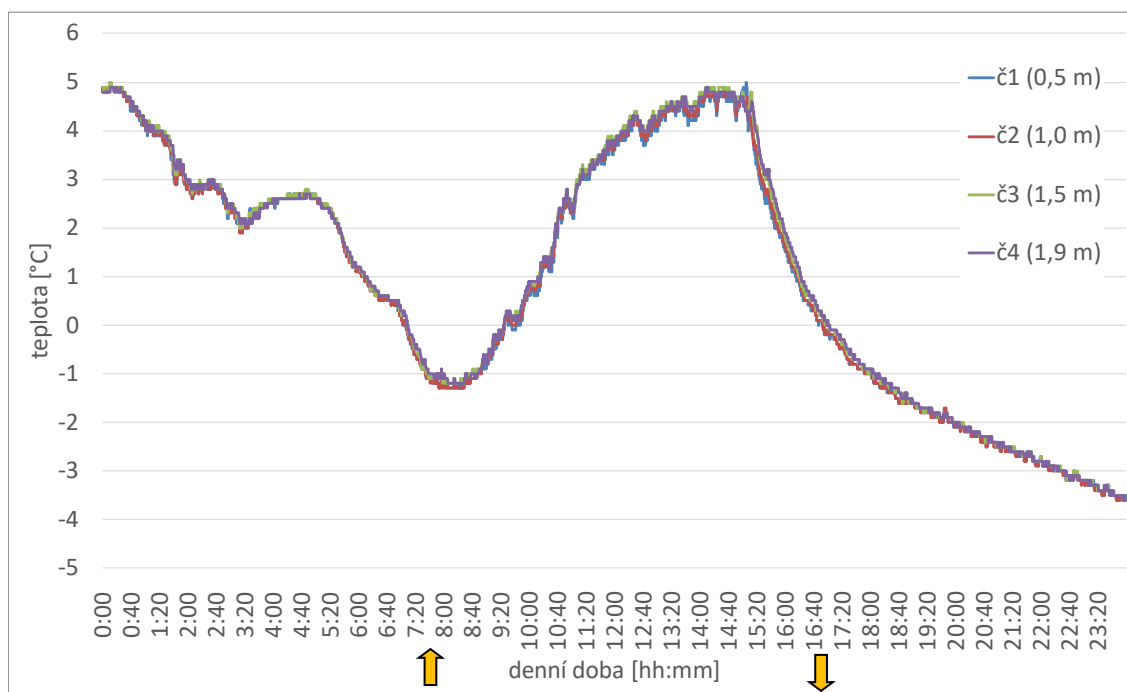
Tab. 18 Doplnkové informace k prováděným měřením

Datum	Nejvyšší tlak [hPa]	Nejvyšší vlhkost [%]	Oblačnost	Vítr	Srážky [mm]	Slunce [hh:mm]	
						východ	západ
1.1. 2020	1003	90	jasno	mírný/ žádný	-	7:41	16:45
21. - 22.3. 2019	1036	75	jasno	mírný/ žádný	-	6:02	18:14
7.5. 2020	1023	80	jasno	mírný/ žádný	-	5:28	20:31
25.6. 2019	1022	85	jasno	mírný/ žádný	-	4:52	21:13

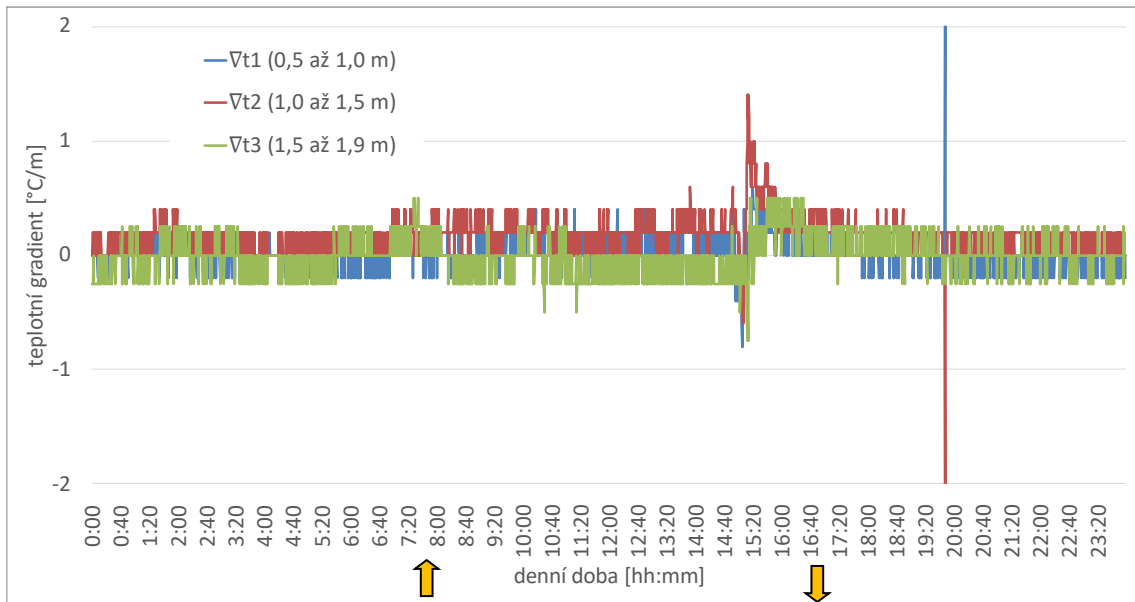
8.3.3.1 Měření 1. 1. 2020

Novoroční měření probíhalo ve slunný zimní den. Teploty a gradienty jsou prezentovány na Obr. 46 a Obr. 47. Teplota během celého dne nepřekročila 5 °C a ani během noci neklesla pod -5 °C. Dobře patrné je i denní maximum v čase cca od 12 do 15 hodin, poté nastává poměrně výrazný pokles trvajícím až do nočních hodin.

Teplotní gradienty jsou téměř nulové (prakticky pod hranicí měřitelnosti) vyjma času okolo 15:00, kdy začalo docházet k prudkému ochlazení. Zajímavý je také výkyv zaznamenaný okolo 19:45, kdy čidla vykazují významný rozdíl a gradient dosáhl hodnoty 4 °C/m (což bylo z důvodu velikosti grafu ponecháno mimo zobrazení).



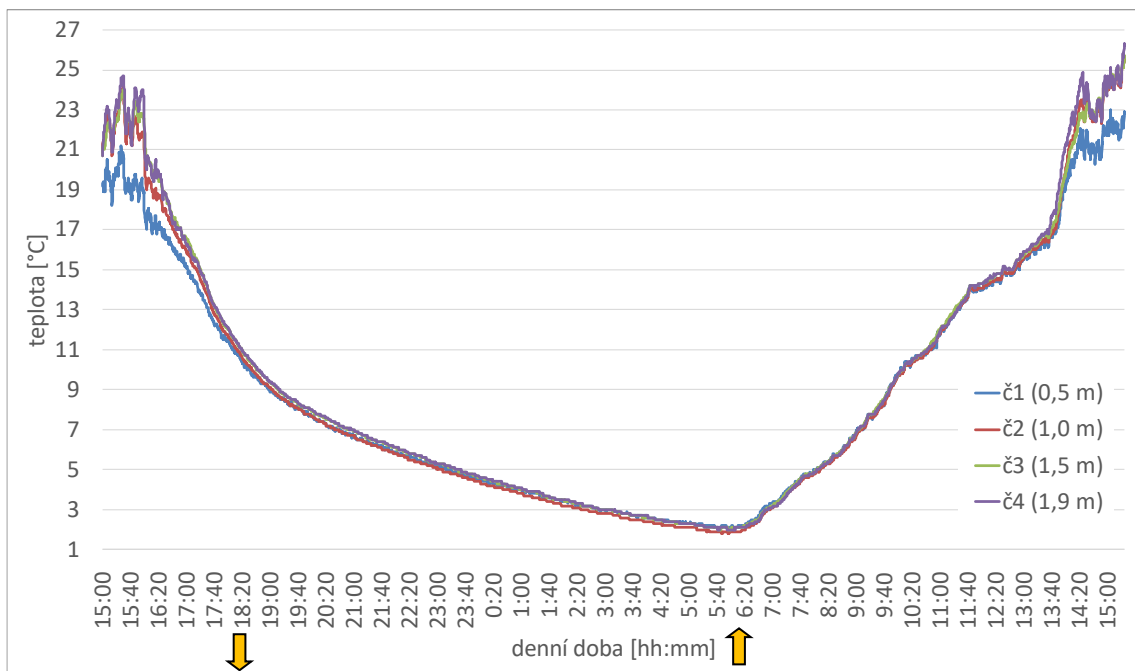
Obr. 46 Měření teploty 1. 1. 2020



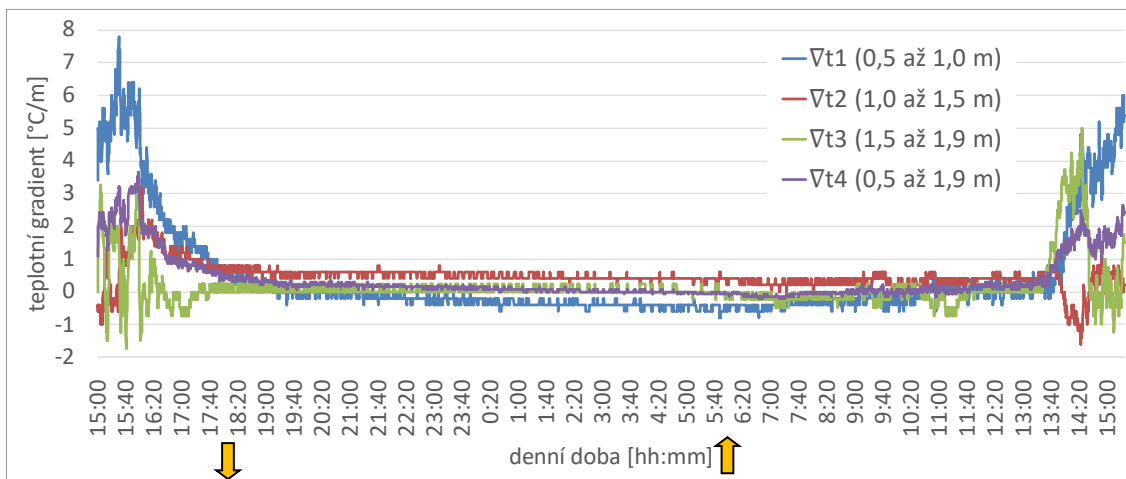
Obr. 47 Vertikální gradienty 1. 1. 2020

8.3.3.2 Měření 22. 3. 2019

Od 21. do 22. března bylo po celou dobu měření jasno, a to se podepsalo na klasickém tvaru křivky teploty (viz Obr. 48 a gradienty na Obr. 49). Teplota po překročení denního maxima v cca 16:00 začne klesat a tento proces pokračuje až do svítání dalšího dne. Vertikální teplotní gradienty jsou poměrně nízké s výjimkou denního maxima, při kterém teplota spodního a horního čidla vykazuje rozdíl cca 4 °C.



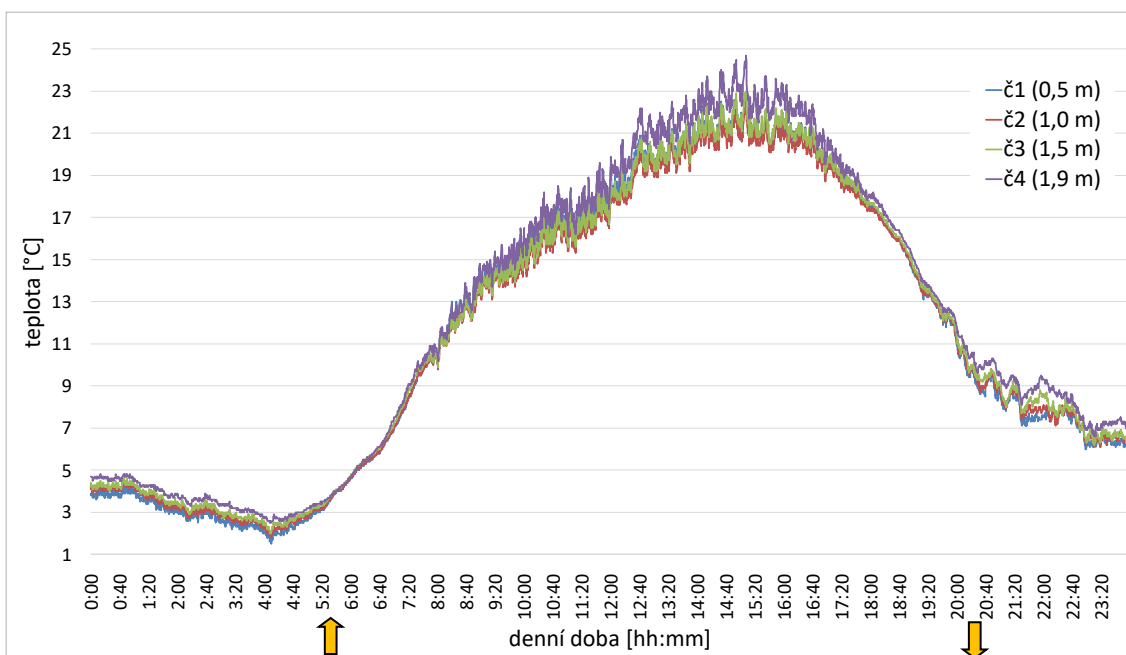
Obr. 48 Měření teploty 21. 3. 2019



Obr. 49 Vertikální gradienty 21. 3. 2019

8.3.3.3 Měření 7. 5. 2020

Dalším zde prezentovaným měřením v rámci dlouhodobého měřického experimentu jsou data ze dne 7. 5. 2020. Na prvním grafu Obr. 50 je vykreslen vývoj teploty v daných výškách. Můžeme si povšimnout výrazného kolísání teploty v odpoledních hodinách a poměrně klidné, ačkoliv rozvrstvené atmosféry v hodinách nočních.

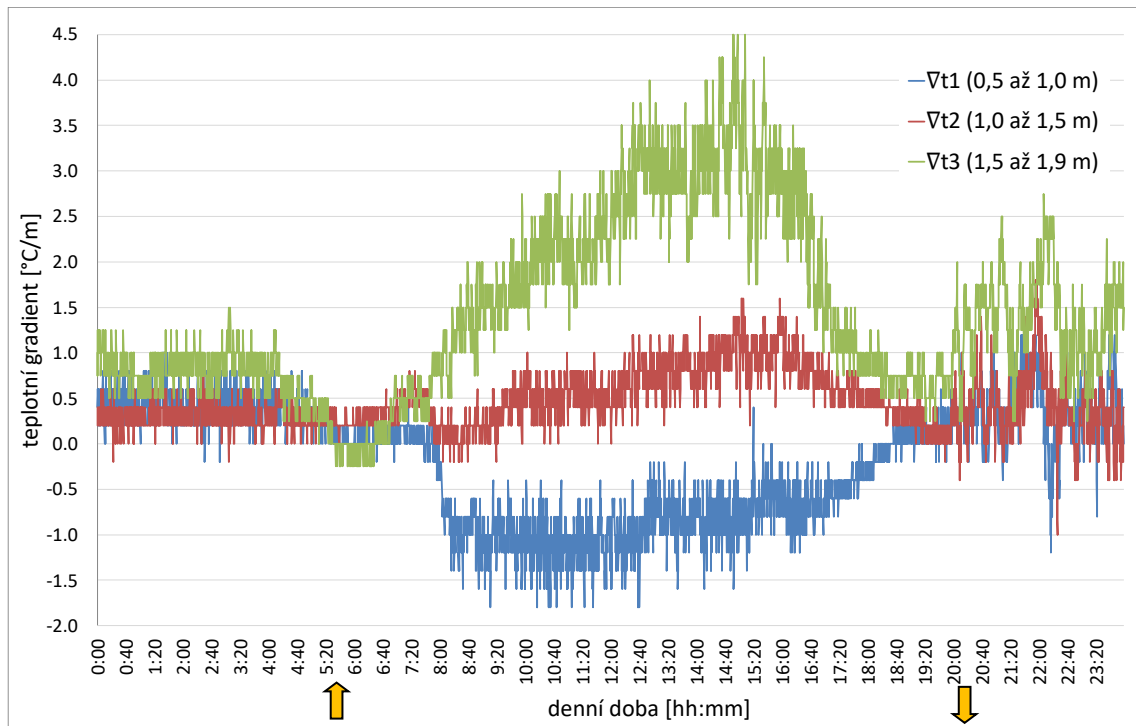


Obr. 50 Měření teploty 7. 5. 2020

Druhý graf Obr. 51 dobře ukazuje často popisovaný jev, že během dne (slunného) dochází k zahřívání povrchu země a teplotní gradient se stane záporným (v tomto případě i ve výšce 0,50 až 1,00 m!). Ve výšce 1,00 až 1,50 je gradient poměrně



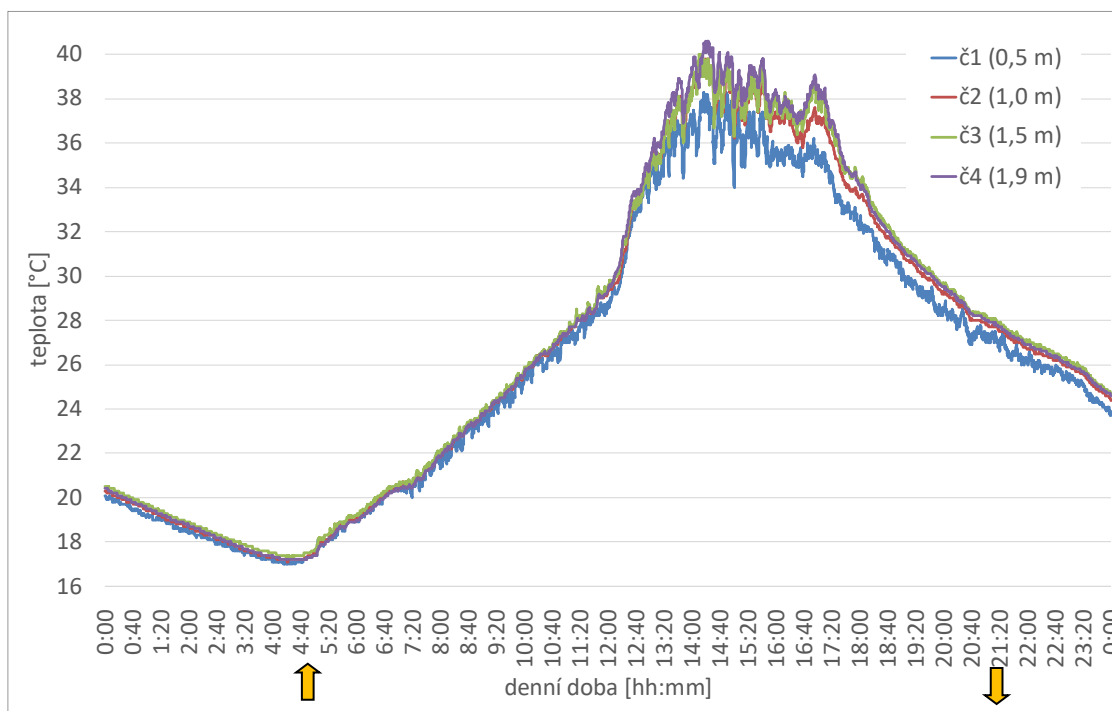
malý, jelikož zde dochází k „vyrovnání“ teploty dané vyzařováním povrchu a teploty vyšší vrstvy (teplejší vzduch stoupá vzhůru). Vrchní vrstva dosahuje vysokých gradientů.



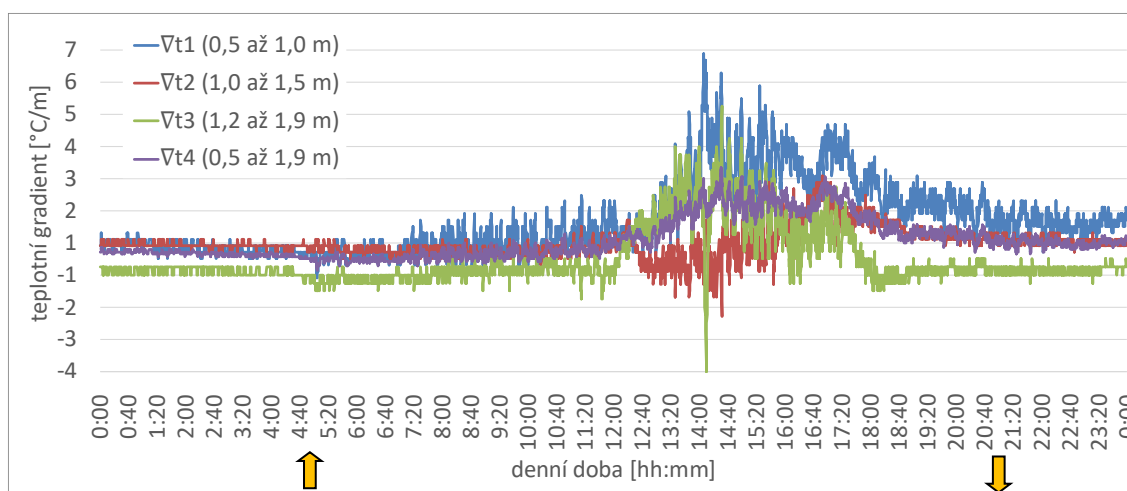
Obr. 51 Vertikální gradienty 7. 5. 2020

8.3.3.4 Měření 25. 6. 2019

Tato data popisují typický horký den v červnu. Teplota vykazuje ukázkový denní trend (viz Obr. 52 a Obr. 53) s tím rozdílem, že interval denního maxima, kdy teploty nejvíce kolísají, zabírá již skoro 4 hodiny. Zároveň během něj dochází k nejvýraznějšímu teplotnímu rozvrstvení a největším změnám teploty. Také je zde vidět velká fluktuace teploty u nejnižše položeného čidla, které je ovlivňováno teplotou u povrchu.



Obr. 52 Měření teploty 25. 6. 2019



Obr. 53 Vertikální gradienty 25. 6. 2019

8.3.4 Výsledky

Za výsledky experimentu lze považovat již samotné určení reálných teplot panujících v průběhu roku v mikroklima přízemní úrovně atmosféry. Tento výzkum nebyl na našem území doposud proveden a v předchozích řešeních refrakce se operovalo s odhady nebo s daty určenými jinde. Samozřejmě není možné použít určené teploty jako obecně závazné, jelikož jsou ovlivněny celým spektrem parametrů jako je poloha, vliv okolních objektů, materiál na povrchu, obsah prachových částic. Přesto jsou data významná pro získání kvalifikovaného odhadu o možných teplotách (teplotních gradientech) v našich podmínkách.



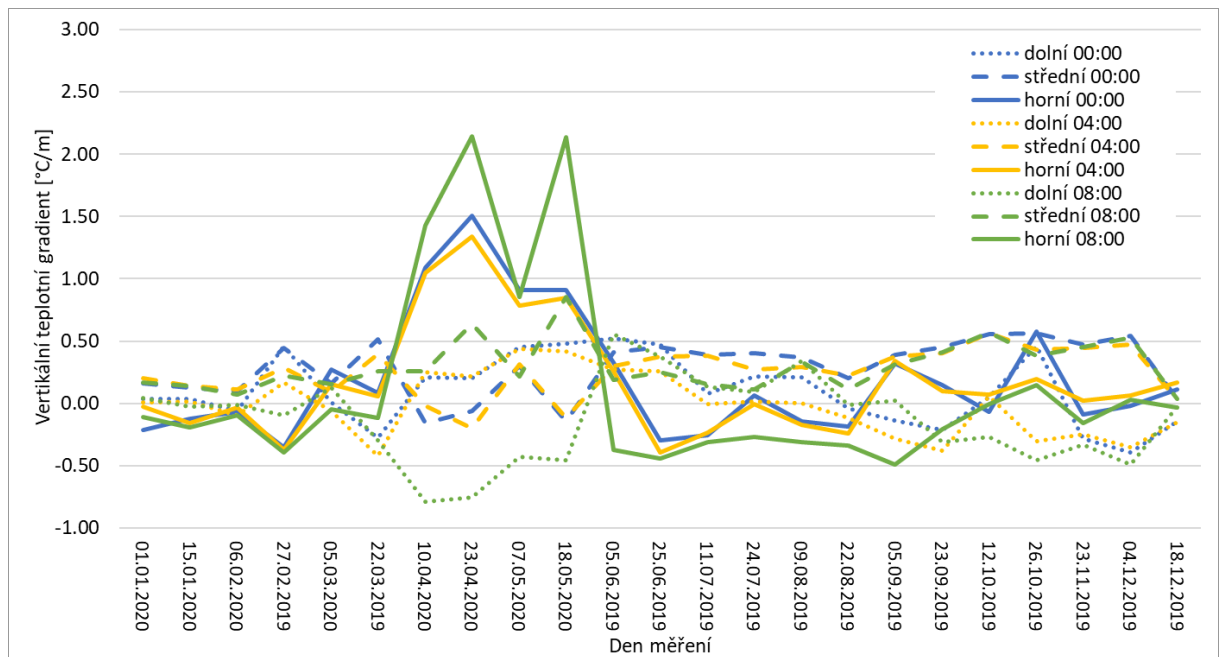
8.3.4.1 Určení teplotních gradientů v průběhu roku

Vzhledem k velkému objemu dat byl vertikální teplotní gradient ∇t počítán pouze pro konkrétní časy v každém dni. Jedná se o časy 00:00, 4:00, 8:00, 12:00, 16:00 a 20:00. Aby byl výpočet gradientu z hlediska definování ročního období spolehlivější bylo použito průměru z měření v periodě -30 až $+30$ min. Výsledný gradient pak získáme průměrem

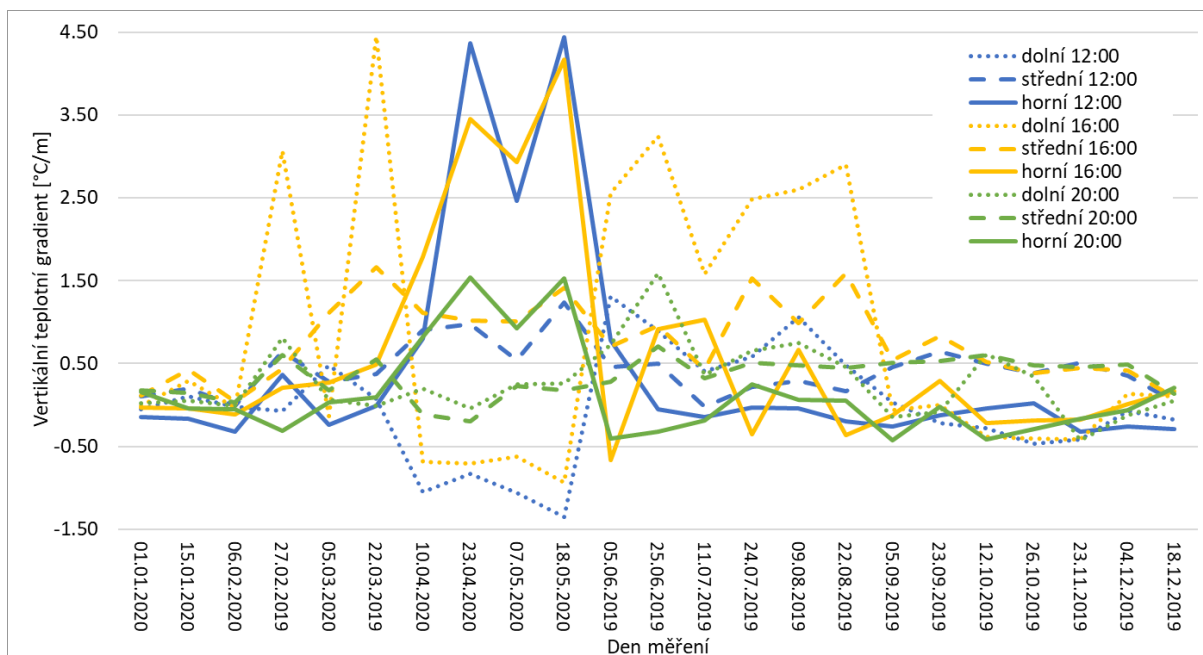
$$\nabla t_{ki} = \frac{\sum_1^n \left(\frac{t_i - t_k}{dH} \right)}{m}, \quad (8.1)$$

kde m je počet měření v dané periodě (-30 až 30 min), t_i a t_k jsou teploty ve výšce i a k , dH rozdíl výšek i a k (rozestup čidel).

Následující Obr. 54 a Obr. 55 zobrazují gradienty pro časy během jednotlivých dní. Tečkovanou čarou je zobrazen gradient pro spodní oddíl (0,5 až 1,0 m), čárkovanou pro střední (1,0 až 1,5 m) a plnou pro horní oddíl (1,5 až 1,9 m). Je zde dobře vidět, že výsledné gradienty mohou nabývat vysokých hodnot přesahující 4 °C/m. Nejvýraznější gradienty jsou během měření na slunném místě (1. 4. 2020 do 20. 5. 2020).



Obr. 54 Průměrné gradienty pro 0:00, 4:00 a 8:00 hodin

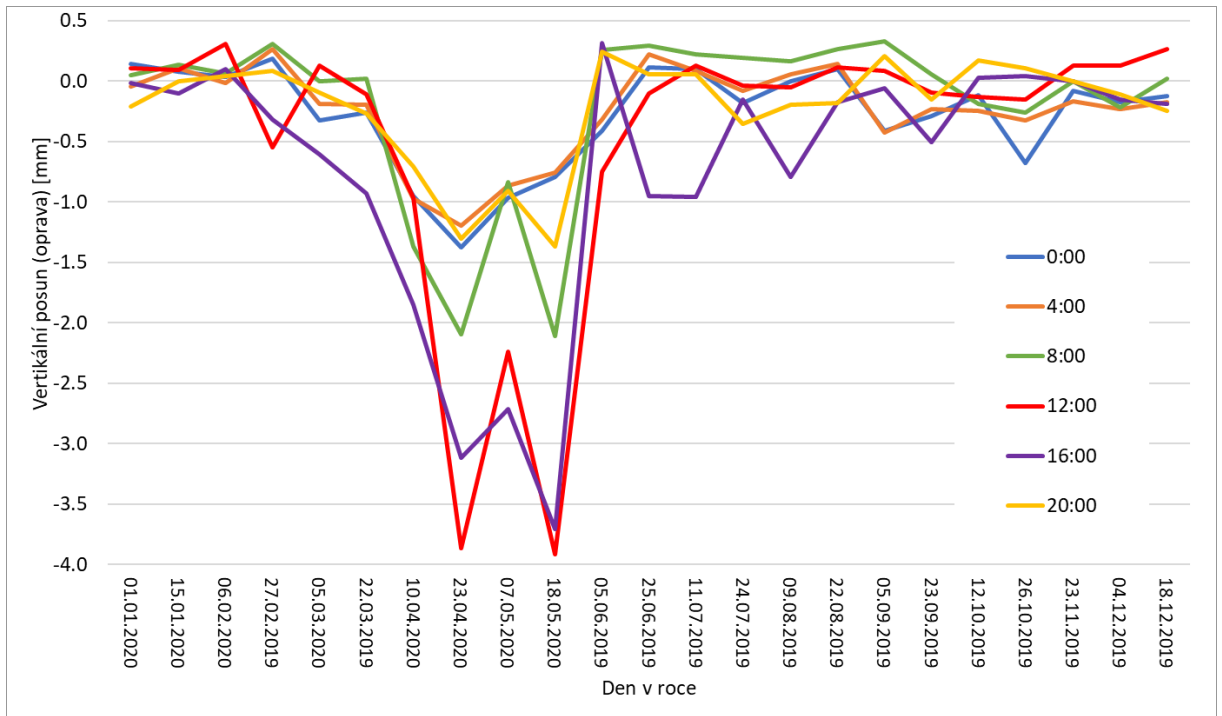


Obr. 55 Průměrné gradienty pro 12:00, 16:00 a 20:00 hodin

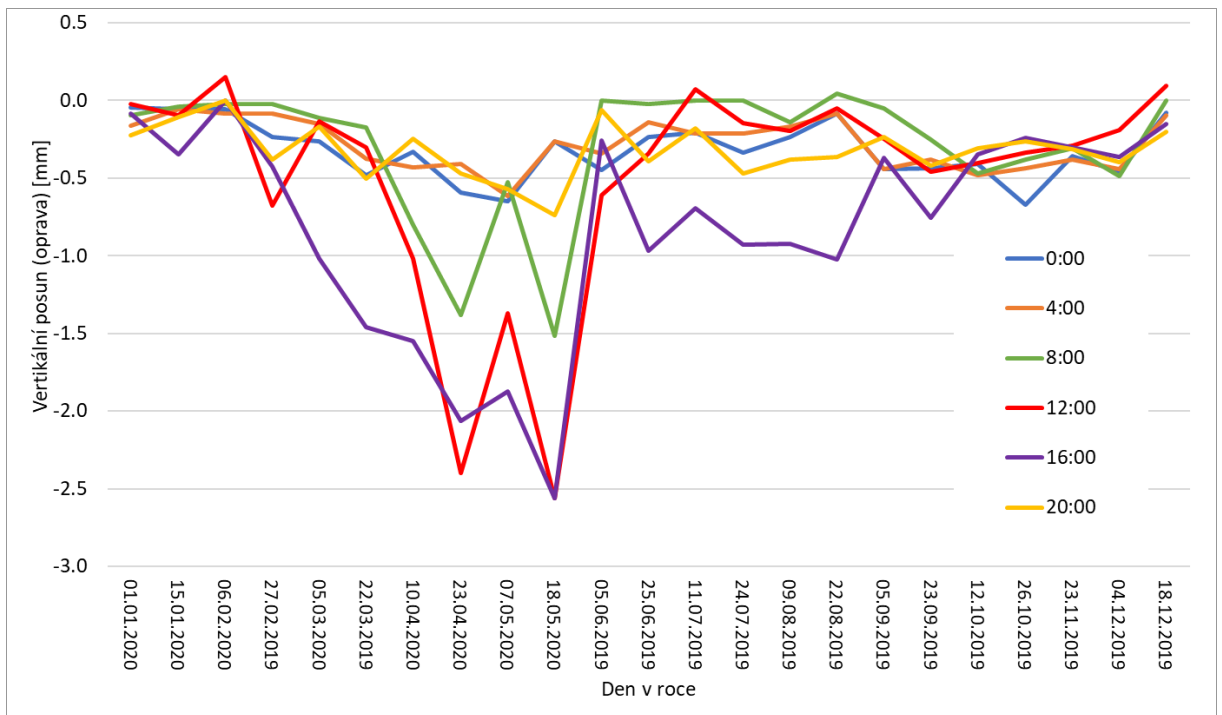
Jelikož se použitý teplotní gradient získá průměrem z poměrně velkého množství měření (cca 180), tak lze očekávat, že jeho přesnost bude vyšší, než jak je vypočítáno v rozbořech přesnosti. Na druhou stranu však nelze uvažovat směrodatnou odchylku průměru z důvodu vlivu systematických chyb zatěžujících naměřený soubor.

8.3.4.2 Určení zdánlivých posunů

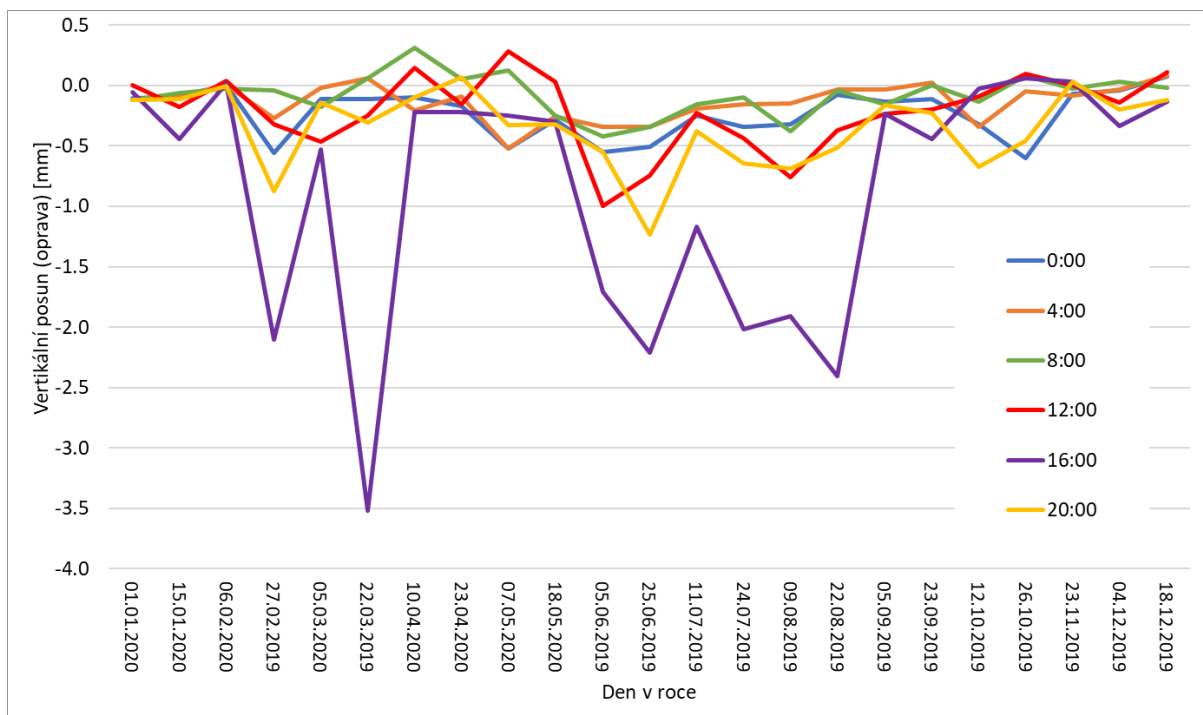
Výpočtem pomocí DRPV (7.2.1.4) lze získat hodnoty vertikálních zdánlivých posunů pro každý průchod. Pro lepší přehlednost jsou výsledky opět zobrazeny pro vybrané denní časy (00:00, 4:00, 8:00, 12:00, 16:00 a 20:00) ve formě následujících grafů Obr. 56, Obr. 57 a Obr. 58, které popisují zdánlivé vertikální posuny (opravy) pro zadané variace zenitového úhlu $z = 99,2 ; 100$ a $101,8$ gon a délku $s = 50$ m.



Obr. 56 Vertikální posuny pro $z = 99,2$ gon



Obr. 57 Vertikální posuny pro $z = 100$ gon



Obr. 58 Vertikální posuny pro $z = 101,8$ gon

Z grafů je dobře patrné, že přímý osvit terénu velmi ovlivňuje vertikální chybu (největší chyby jsou vypočítané u dní, kdy byla konstrukce umístěna na slunné pozici). Dále je dobré připomenout, že vypočítaná odchylka v některých dnech a časech je pro mnohé geodetické aplikace naprosto zásadní a je třeba ji uvažovat nebo adekvátně změnit princip nebo čas měření. Nejvyšších odchylek je dosahováno zpravidla v odpoledních hodinách, kdy v letních měsících není výjimkou chyba přesahující 2 mm. Naopak nejnižších chybu pozorujeme brzy ráno a později v noci, kdy zpravidla nepřesahuje 1 mm.

8.3.4.3 Skutečná trajektorie paprsku

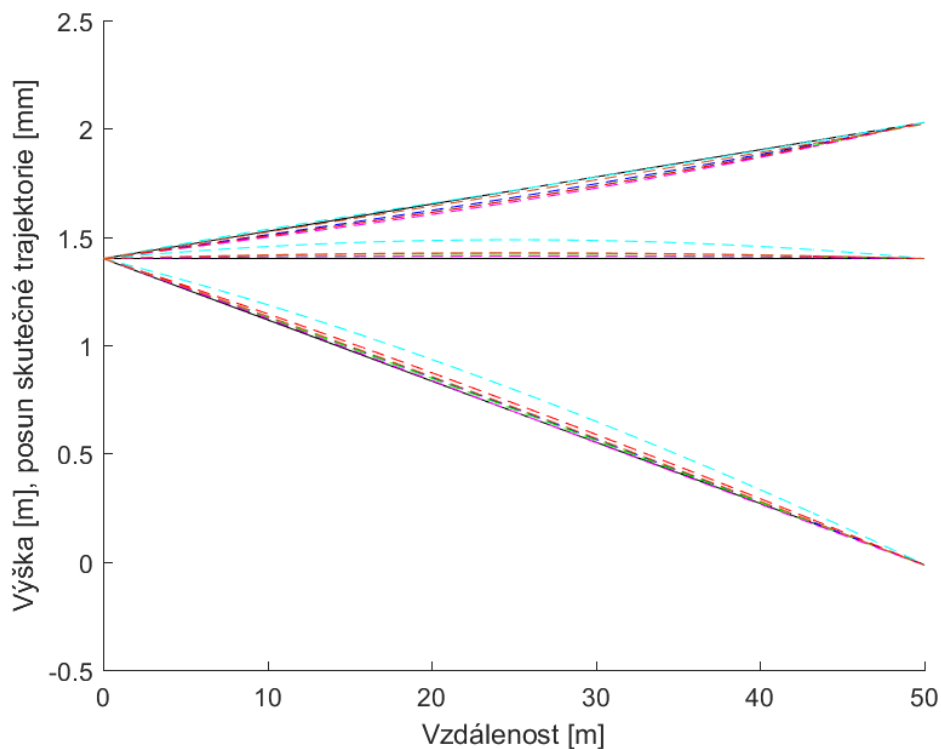
Pro lepší představu o realizaci skutečné trajektorie jsou přiloženy také grafy Obr. 59 až Obr. 61 zobrazující průchody paprsku ve vybraných dnech. Přímá spojnice je zobrazena černou barvou a rozdíly trajektorie od přímé spojnice v konkrétním bodě jsou pro lepší přehlednost vynásobeny 1000 (jsou tedy v mm).

Grafy zobrazují všechny tři varianty zenitových úhlů najednou a jednotlivé průchody dle denní doby jsou vyobrazeny čárkovanou čarou barvy dle Tab. 19.

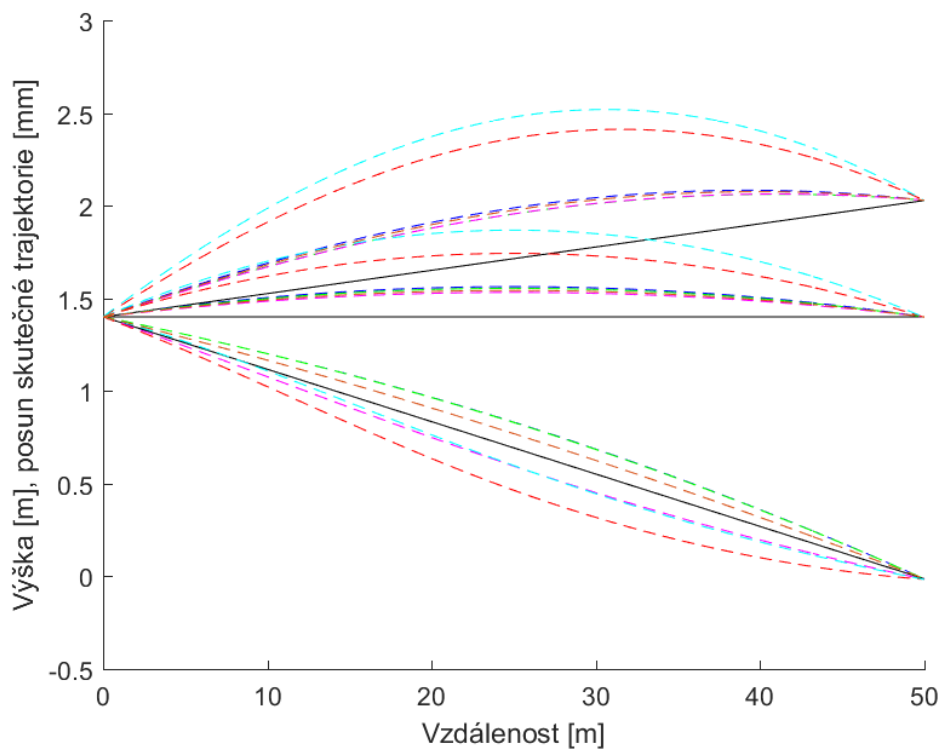
Tab. 19 Barvy jednotlivých průchodů

Trajektorie	přímá	0:00	4:00	8:00	12:00	16:00	20:00
Barva	černá	modrá	zelená	červená	oranžová	žlutá	šedá

Povšimněte si, že u Obr. 59 je trajektorie paprsku plochá a velmi blízká přímce. Pro $z = 99,2$ gon je křivka vypuklá směrem k povrchu, zatímco pro ostatní je obrácená. Toto je způsobeno záporným gradientem ve vyšší části měřeného rozsahu.



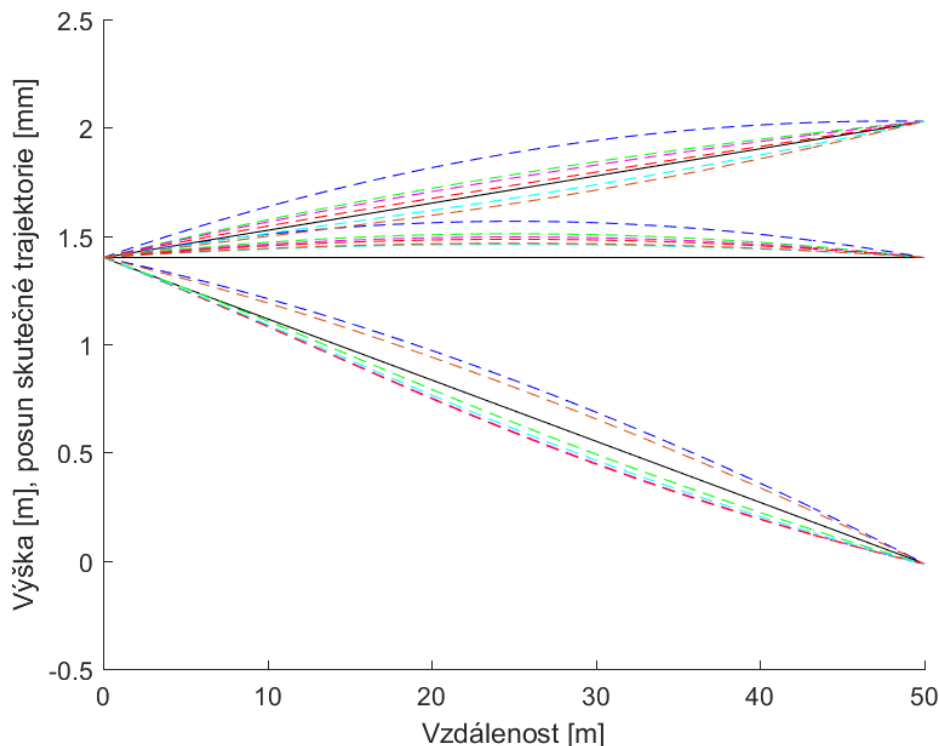
Obr. 59 Skutečná trajektorie paprsku dne 15. 1. 2020



Obr. 60 Skutečná trajektorie paprsku dne 7. 5. 2020



Na grafu Obr. 60 je vyobrazen stav, kdy byla aparatura umístěna na slunném místě. Gradienty jsou velmi vysoké a vertikální odchylky také. Důležité je, že pro $z = 99,2$ a 100 gon je křivka vždy konkávní, zatímco pro $z = 101,8$ gon je přes den (8:00 až 16:00) konvexní (na většině trajektorie) a v noci konkávní. To je způsobeno velkým teplotním sáláním povrchu.



Obr. 61 Skutečná trajektorie paprsku dne 26. 10. 2019

U posledního vyobrazeného měření (viz Obr. 61) z konce října jsou křivky poměrně ploché, ale stav je velmi proměnný. Pro $z = 99,2$ gon je dopoledne konkávní, v poledne téměř přímá a odpoledne konvexní. Při vodorovné záměře $z = 100$ gon je křivka vždy konkávní a pro $z = 102,8$ gon je v nočních hodinách (0:00 a 20:00) křivka konkávní a přes den konvexní vlivem tepelného vyzařování povrchu.

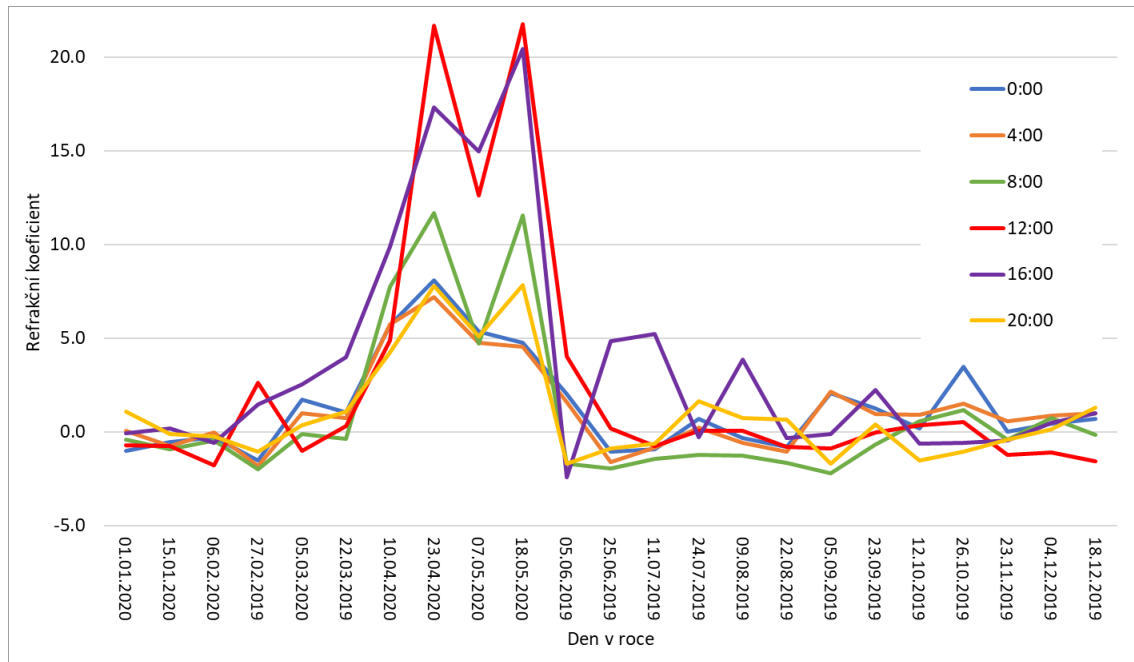
8.3.4.4 Refrakční koeficient

V kapitole 4.2.1 je mimo jiné vysvětlen termín refrakční koeficient, který definuje poměr zemského středového úhlu a úhlu úplné refrakce (středový úhel refrakční křivky). Tento parametr byl poměrně široce používán v pracích popisujících refrakci v minulém století. V České republice (Československu) je známý především ve svém konkrétním (průměrném) vyjádření, které stanovil pan C. F. Gauss $k = 0,1306$. Je vhodné připomenout, že takto určených koeficientů vznikalo v průběhu doby mnoho (i sám Gauss jich určil hned několik). Podrobně se problematikou Gaussova koeficientu zabývá T. Křemen ve svém článku [13].

Použitím výše uvedeného vzorce (4.26) můžeme z iteračně určených zdánlivých posunů, nebo refrakčních úhlů snadno vypočítat refrakční koeficient.



Výsledkem je refrakční koeficient pro každé měření (čas a zenitový úhel). V grafu Obr. 62 jsou zobrazeny výsledky pro $z = 99,2$ gon a všechny zkoumané dny a denní doby. Je vidět, že koeficient nezděrně přesahuje hodnotu +3 a výrazně méně nabývá záporných hodnot. U měření na slunném místě dosahuje dokonce hodnot přesahujících +20, naopak u měření ve stínu se maximální hodnoty pohybují do +5. V zimních měsících se koeficient příliš neodchyluje od hodnoty 0.



Obr. 62 Refrakční koeficient pro $z = 99,2$ gon

Důvodů velmi výrazné rozmanitosti oproti tzv. průměrným koeficientům určených z vyrovnání sítí je několik. Za nejdůležitější lze považovat konkrétní aplikaci. Při měření velkých sítí (jako je Gaussova síť v Hannoveruském království z let 1821 až 1825) je stanovisko umístěno na vyvýšeném místě (z důvodu lepší observace na často kilometry vzdálené body sítě) a zpravidla velká část záměry prochází vysoce nad terénem (desítky metrů). Nebylo ani výjimkou použití měřických věží. Teplota v takové výšce se chová zcela jinak než teplota určená zde prezentovaným měřením ve výšce do 2 m nad terénem.

Důležitým faktem zůstává, jak je zmiňováno ve většině zdrojů zabývajících se geodézií, že koeficient je velmi proměnný. Böhm v [71] na str. 255 píše: „Jeho hodnota silně kolísá, ve střední Evropě v normálních podmínkách od 0,08 do 0,18, takže Gauss určil empiricky jeho střední hodnotu 0,13.“ Z těchto měření je vidět, že domnělá proměnnost je mnohem výraznější (tedy pro kratší záměry blízko terénu), než bylo doposavad usuzováno. O tomto faktu se zmiňuje i sám Gauss v popisu jedné z tabulek: „Střední hodnota ze všech určení s přihlednutím k délkám stran je 0,1306. Je patrné, že anomálie (odchyly) v malých vzdálenostech jsou mnohem větší než ve vzdálenostech větších.“



8.3.5 Závěry experimentu

Roční experiment měl za úkol měřicky určit reálné teploty, které se na našem území mohou vyskytnout, a kriticky vyhodnotit jaký vliv v průběhu roku může refrakce mít. Experiment byl směřován právě na inženýrskou geodézii, která se zpravidla vyznačuje kratšími vzdálenostmi a vyšší přesností (nejčastěji v řádu mm). Z výsledků je zřejmé, že pro tato měření existují roční a denní doby, kdy opravdu není vhodné měřit, jelikož vyžadovaná přesnost může být překročena samotným vlivem refrakce. Stejně tak se potvrdilo známé pravidlo, že během polední až odpolední doby dosahuje vliv refrakce nejvyšších hodnot a naopak v nočních nebo velmi brzkých ranních hodinách lze očekávat nejlepší podmínky pro přesné měření. Velmi nepříznivě ovlivňuje výsledky měření nad slunným terénem. Měření blízko terénu při slunném dni není vhodné kvůli extrémnímu teplotnímu gradientu. Na druhou stranu strmost záměry také negativně ovlivňuje výsledná data. Teoretický ideál by bylo měření ve vrstvě, kdy se teplo vyzařované povrchem a teplota vyšší vrstvy atmosféry navzájem rovnají... Toto samozřejmě není možné snadno určit, ale výsledky naznačují, že se jedná o cca výšku běžného postavení přístroje a hranolu (1,5 až 1,7 metru).

Jistým nebezpečím vyplývajícím z pozorování je fakt, že během noci není atmosféra homogenní, ale je výrazně klidnější a více se ustaluje rozvrstvení atmosféry. To však může mít za následek systematický vliv na měřená data, který nebude možné poznat při měření. Jedinou cestou odhalení takové chyby by bylo opětovné měření ideálně v jiný den (jinou noc), kdy se atmosféra rozvrství jinak. To však v praxi není často možné.

Výsledky také jasně ukazují, že atmosféra je velmi proměnná a nelze ji jednoduše popsat jedním univerzálním číslem, jak je někdy chybně prezentován Gaussův refrakční koeficient $k = 0,1306$. Toto číslo popisuje atmosféru v konkrétní oblasti, která je velmi vzdálená aplikaci inženýrské geodézie.

Ačkoli se z pohledu měření tento pokus jeví poměrně robustně, není možné jej vnímat jako seznam oprav při měření v dané části roku a v daný čas. Přínosem budiž konkrétní představa o stavech, které lze očekávat v našich podmínkách u měření v blízkosti terénu. Nelze ani považovat za pravdu, že se teplota v atmosféře systematicky rozvrství, a že měření teploty (teplot) u přístroje popisuje teplotu v celém rozsahu dráhy paprsku. Na rozdíl od vertikálního teplotního gradientu, který se jeví systematicky, je gradient ve vodorovném směru poměrně náhodný ačkoli zpravidla výrazně menší.

8.4 Experiment horizontální stability teploty

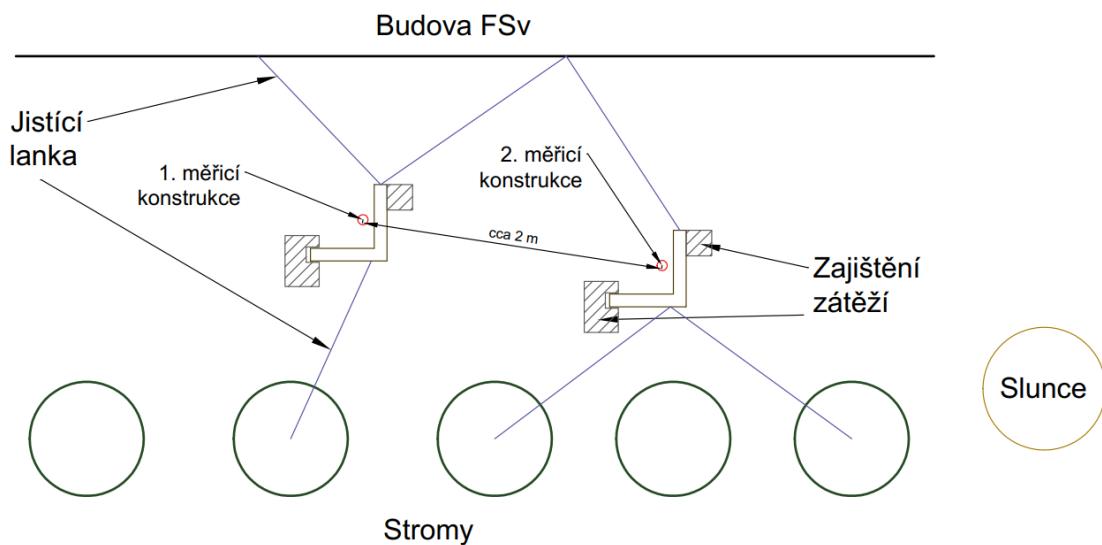
V případě měření teplotního gradientu je samozřejmě největší potíž v tom, že neznáme jeho průběh v trase paprsku (teplota není měřena ve všech bodech dráhy). Experimenty v kapitole 8.3 tedy vycházejí z předpokladu, že teplota se vyvíjí ve vertikálním směru výrazně rychleji a systematicky, zatímco v horizontálním směru jen nepatrně a náhodně. Náhodnost samozřejmě platí jen v případě, kdy se paprsek pohybuje nad zhruba stejným druhem povrchu (paprsek například nepřekonává asfaltovou komunikaci nebo neprochází v blízkosti kovové konstrukce).



Následující experiment by měl odpovědět na otázku jak a zda vůbec je možné nahlížet na předpoklad vertikálního rozvrstvení atmosféry na malém homogenním území. Pro tento účel budou porovnány teploty (gradienty) určované současně dvěma soupravami pro měření teplot.

8.4.1 Nastavení experimentu

Pro potřeby experimentu byly použity dvě dvoumetrové konstrukce (viz 6.2.2) umístěné od sebe cca 2 m na stejném prostranství jako v případě periodického měření. Schéma rozmístění a ukotvení je zobrazeno na Obr. 63. Měřeno bylo kombinací obou typů odporových senzorů (kapitoly 6.1.1.1 a 6.1.1.2) a záznamníků S 0141 (viz 6.3.2). Data byla sbírána nepřetržitě v rozsahu tří dní (s mezerou v době stahování dat cca 40 s) se záznamem teplot po 20 sekundách.



Obr. 63 Rozmístění pomůcek v areálu FSv, dvě konstrukce

8.4.2 Rozbory přesnosti

V návaznosti na kapitolu 6.4 bude pro směrodatnou odchylku rozdílu vertikálních teplotních gradientů $\sigma_{\Delta\nabla t}$ platit vztah

$$\sigma_{\Delta\nabla t} = \sigma_{\nabla t} \cdot \sqrt{2} = 2 \cdot \frac{\sigma_t}{d} \quad (8.2)$$

Mezní rozdíl gradientů $\Delta M_{\Delta\nabla t}$ pak vypočítáme jako

$$\Delta M_{\Delta\nabla t} = u_p \cdot \sigma_{\Delta\nabla t}, \quad (8.3)$$



kde u_p je koeficient spolehlivosti a je volen 2 (je pouze orientační, jelikož normalita souboru nebyla ověřena). Po dosazení do rovnic dostaneme výsledky uvedené v Tab. 20.

Tab. 20 Přesnost teplotních gradientů a jejich rozdílů

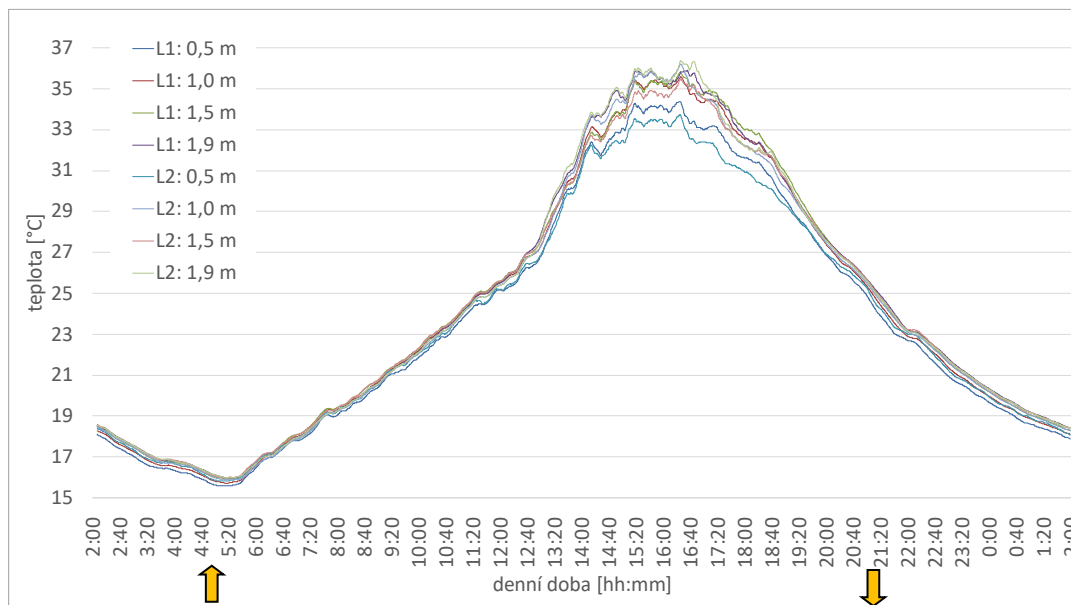
Rozsah gradientu Δt	(0,5–1,0 m)	(1,0–1,5 m)	(1,5–1,9 m)	(0,5–1,9 m)
$\sigma_{\nabla t}$ [°C/m]	0,42	0,42	0,53	0,15
$\sigma_{\Delta \nabla t}$ [°C/m]	0,60	0,60	0,75	0,21
$\Delta M_{\Delta \nabla t}$ [°C/m]	1,20	1,20	1,50	0,42

Jak již bylo zmíněno výše, reálná přesnost určování gradientů je vyšší (zřejmě cca 0,25 °C/m), jelikož uvedený rozbor ignoruje fakt, že je měřeno stejným záznamníkem ve stejný čas (což měřenou teplotu zatěžuje systematickou neznámou chybou). Tuto domněnku také podporuje tento i předchozí experimenty.

8.4.3 Výsledky

Z důvodu rozsahu práce je zde uvedeno jen měření v délce 24 hodin ze dne 4. 6. 2019. Formou grafu rozdílů teplot mezi čidly ve stejné výšce a grafu rozdílů vertikálních gradientů teplot.

Měřené teploty z obou konstrukcí jsou uvedeny v Obr. 64, kde L1 je označení pro první konstrukci a L2 pro druhou. Data jsou pro přehlednost upravena pomocí klouzavého průměru s velikostí okna 40 měření (naměřená data vykazují přílišnou oscilaci, která neumožňuje přímé zobrazení).

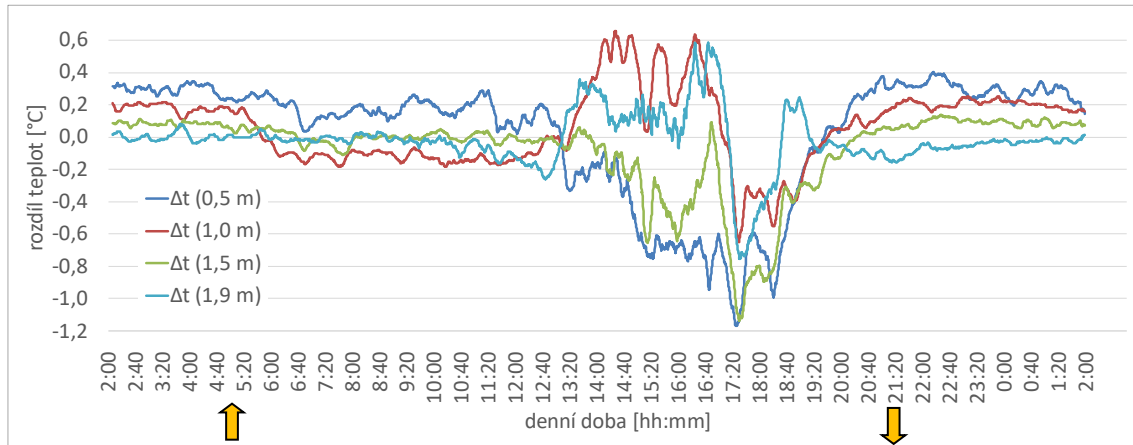


Obr. 64 Měření teploty – obě konstrukce



Výsledný korelační koeficient mezi oběma soupravami je roven pro každou z teplot určených v daných výškách více než 0,99, což je ovšem zavádějící hodnota, jelikož reflektuje celkový rozsah teploty (od 15 °C do 36 °C)

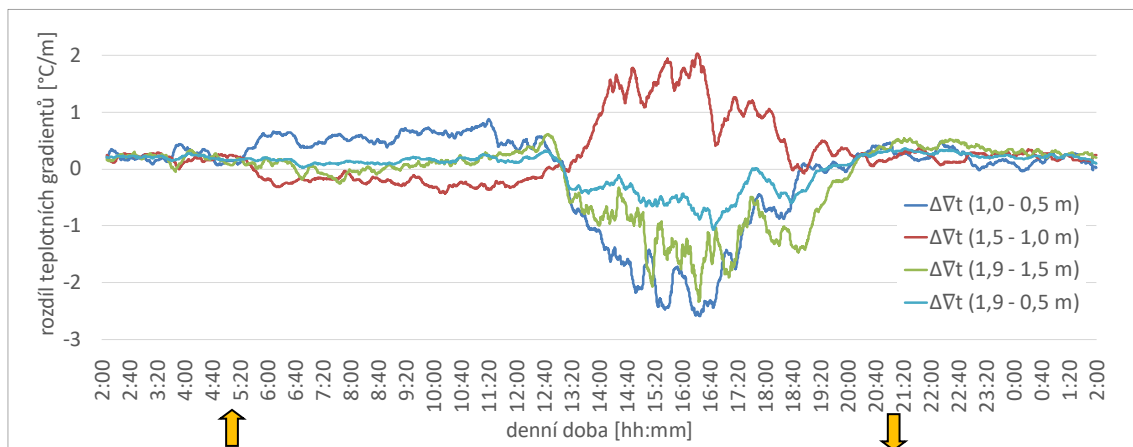
Pro lepší přehlednost jsou na Obr. 65 uvedeny rozdíly teplot na konstrukcích pro jednotlivé výšky (0,5; 1,0; 1,5; 1,9 m nad povrchem). Opět se jedná o data upravená klouzavým průměrem.



Obr. 65 Rozdíly teplot měřených na konstrukcích

Zde už je lépe patrné, že zvláště v denních hodinách jsou rozdíly v řádu stupňů a především proměnné, zatímco během noci a rána vidíme poměrně dobře systematické chování rozdílů.

Na následujícím Obr. 66 jsou vyneseny rozdíly teplotních gradientů (upravené klouzavým průměrem) pro jednotlivé výškové úseky.



Obr. 66 Rozdíly vertikálních teplotních gradientů

Je zde vidět, že v dopoledních a nočních hodinách rozdíly zhruba odpovídají směrodatným odchylkám a lze říci, že se přízemní atmosféra poměrně ustálila. Naopak v době denního maxima a pozdního odpoledne nabývají rozdíly vyšších hodnot (−3 °C/m). Korelační koeficienty pro dané teplotní gradienty nám poskytnou ještě lepší náhled na problematiku (Tab. 21).



Tab. 21 Korelační koeficienty teplotních gradientů

Úsek	$\nabla t [^{\circ}\text{C}/\text{m}]$			
	1,0 – 0,5 m	1,5 – 1,0 m	1,9 – 1,5 m	1,9 – 0,5 m
Korelační koeficient	0,90	0,50	0,70	0,90

Zatímco korelace v nejnižší úrovni atmosféry je značná (0,9), což se dá vysvětlit systematickým vlivem povrchu, tak už ve druhé výškové úrovni nabývá hodnoty jen 0,5 (což prakticky znamená téměř „nezávislé“ jevy). O něco vyšší korelace vykazuje vrstva nejvyšší, která ukazuje na částečné potvrzení stratifikace atmosféry.

V Tab. 22 jsou uvedena vybraná statistická data reprezentující vypočítané veličiny.

Tab. 22 Statistická data souboru

Kritérium	$\Delta t [^{\circ}\text{C}]$				$\Delta \nabla t [^{\circ}\text{C}/\text{m}]$			
	0,5 m	1,0 m	1,5 m	1,9 m	1,0 – 0,5 m	1,5 – 1,0 m	1,9 – 1,5 m	1,9 – 0,5 m
Prům. abs. odchylka	0,31	0,20	0,19	0,13	0,65	0,43	0,56	0,25
Minimum	-1,60	-0,90	-1,60	-1,30	-3,80	-0,80	-3,75	-1,50
Maximum	0,70	1,10	0,80	1,10	1,20	3,20	2,00	0,50
Medián	0,20	0,10	0,00	0,00	0,20	0,20	0,00	0,14
Směrodatná odchylka	0,40	0,25	0,28	0,23	0,89	0,60	0,76	0,33

8.4.4 Závěry experimentu

Experiment měl za úkol prokázat, zda lze považovat za platné teplotní rozvrstvení atmosféry v její nejnižší úrovni. Výsledky naznačují, že minimálně v nejnižší úrovni (kde je nejvýraznější vliv povrchu) bude toto pravidlo platit. Nicméně nelze považovat za platné, že teplota určená v jednom bodě (polohově myšleno) bude platit i pro body v okolí. Stejně tak je patrné, že uvažovat o použití jen jedné měřicí soupravy (a určení jednoho teplotního gradientu) pro popis celé dráhy by bylo zjevně chybné. Tudíž prosté dosazení jednoho teplotního gradientu (teploty) do jednoduchých vzorců (7.2.1.1 a 7.2.1.2) by pravděpodobně nevedlo ke správným výsledkům. Logicky by bylo potřeba alespoň změřit těchto teplot (gradientů) více ve směru měření a následně vhodně upravit vztahy, aby tato měření reflektovaly.

Takovýchto experimentů bylo uskutečněno celkem 5 s podobnými výsledky, tyto variace zde z důvodu rozsahu práce nejsou uváděny.

8.5 Experimenty se čtyřmetrovou konstrukcí

Zatím jsme se věnovali pouze určování teplotního gradientu v rozsahu do 2 metrů nad terénem. Nicméně v běžné inženýrské geodézii se dostáváme i do situací, kdy jsou záměry poměrně strmé a paprsek prochází vyššími úrovněmi atmosféry. Abychom zjistili stavy panující ve vyšší úrovni atmosféry, tak byla navržena a zkonstruována čtyřmetrová varianta konstrukce (viz 6.2.2.1). V tomto bodě je třeba podotknout, že bylo velmi obtížné ukotvit takto vysokou konstrukci, jelikož vítr tlačící na konstrukci získává díky páce velmi velkou sílu.



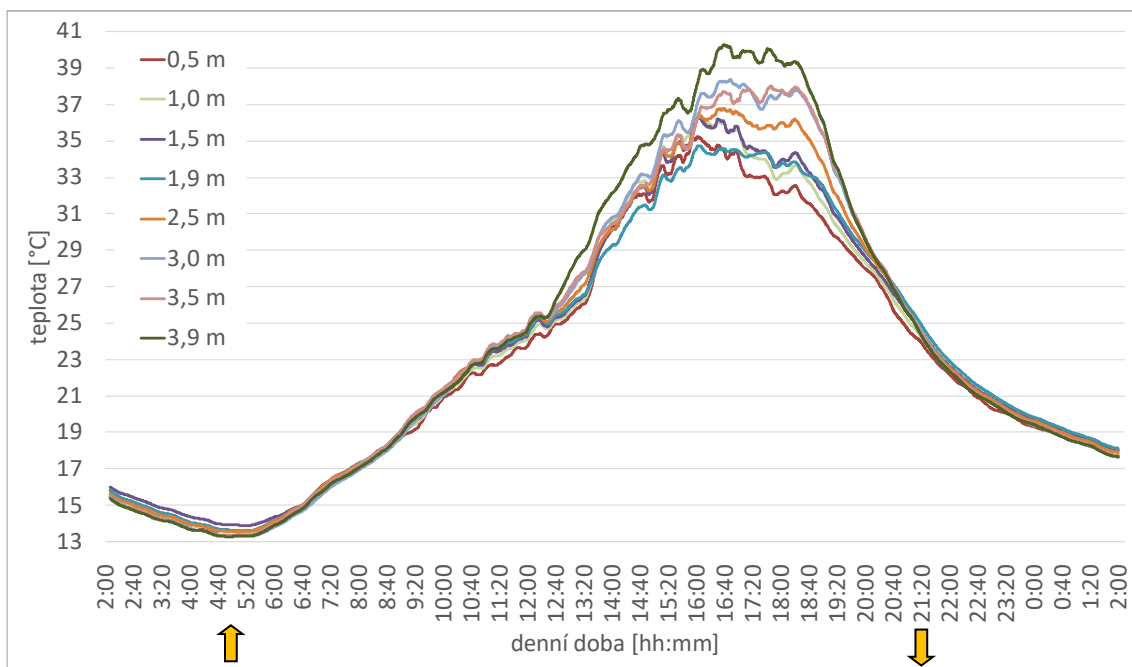
8.5.1 Nastavení experimentu

Do čtyřmetrové konstrukce byly osazeny odporové senzory (kombinace obou variant 6.1.1.1 a 6.1.1.2) a měřeno bylo nad dvěma povrchy pro získání porovnání vlivu podkladu – nad travnatým povrchem a nad asfaltem. Záznam čidel byl opět nastaven na 20 sekund.

8.5.2 Výsledky nad travnatým povrchem

V následujících grafech jsou z důvodu rozsahu prezentována data z 29. 6. 2019, ačkoli měření probíhalo delší dobu (zhruba 3 dny).

Na Obr. 67 je prezentován vývoj teploty během dne (opět upravené klouzavým průměrem s velikostí okna 40). Je zde dobře vidět, že tepelné rozvrstvení je výraznější ve větší výšce.



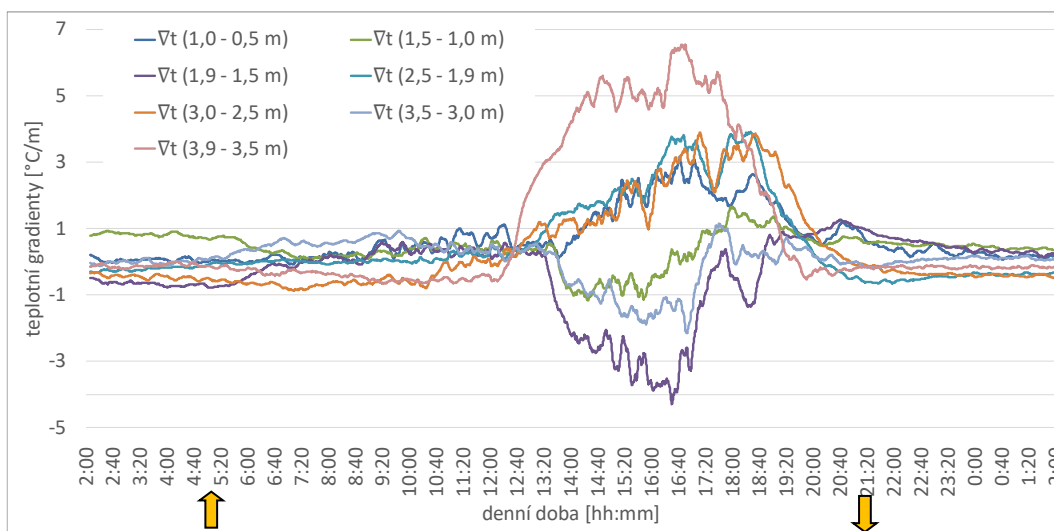
Obr. 67 Průběh teploty 29. 6. 2019

Je zajímavé, že teplota ve výšce 3,0 a 3,5 metru nad terénem je prakticky stejná a narušuje tím jinak dobrou představu o stratifikaci atmosféry. Zdá se, že v takto horkém dni se atmosféra dokáže poměrně dobře rozvrstvit. Ale také zde vidíme případy, kdy tento princip dodržen není, tudíž se na předpoklad vytvoření stabilních vrstev nemůžeme spolehnout a je potřeba jej v případných aplikacích aktivně ověřovat.

Na grafech Obr. 68 jsou vyobrazeny teplotní gradienty (upravené klouzavým průměrem) mezi senzory.



ČVUT v Praze – Fakulta stavební
Disertační práce – Měřické experimenty



Obr. 68 Teplotní gradienty určené 29. 6. 2019

Gradienty nám poskytují přehlednější vhled do pozorovaných jevů. Zatímco až do cca 12 hodin nabývají velmi malých hodnot ve všech úrovních, tak v denním maximu (do cca 18:00) vidíme znatelný nárůst až k hodnotám 6 °C/m v nejvyšší úrovni, přičemž je pravděpodobné, že by se teplota i nadále zvyšovala. Otázkou, na kterou není v tuto chvíli odpověď, je, kam až dosahuje tento princip zvyšování teploty s výškou nad terénem. Statistická data popisující změřené teplotní gradienty jsou uvedeny v Tab. 23.

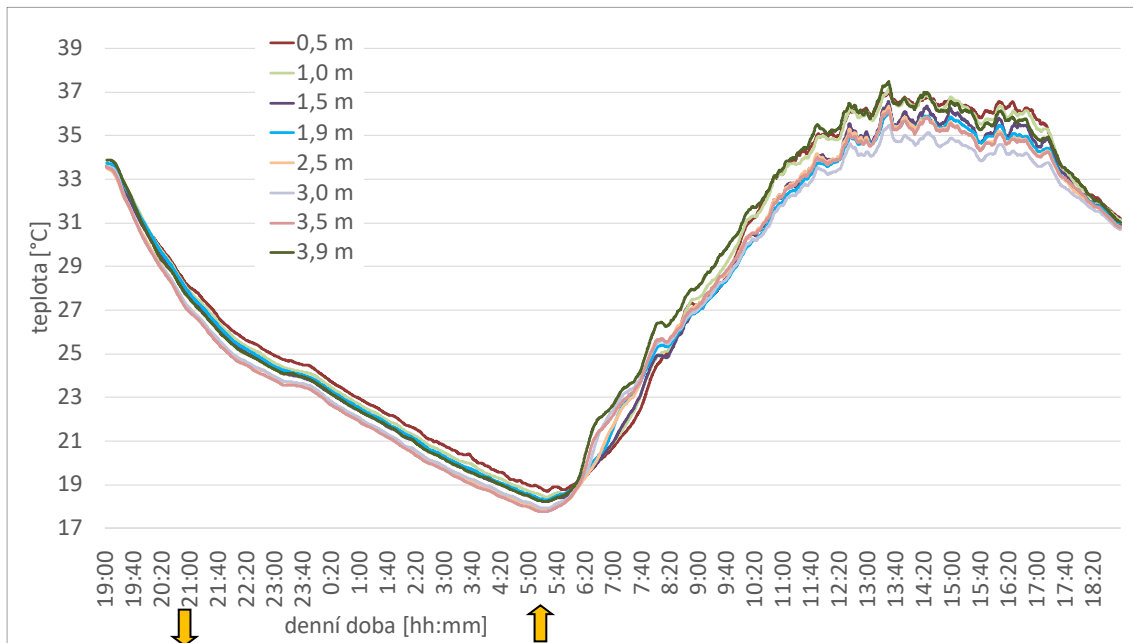
Tab. 23 Statistická data souboru

Kritérium	$\Delta \nabla t$ [°C/m]						
	1,0 - 0,5 m	1,5 - 1,0 m	1,9 - 1,5 m	2,5 - 1,9 m	3,0 - 2,5 m	3,5 - 3,0 m	3,9 - 3,5 m
Minimum	-0,09	-1,17	-4,30	-0,65	-0,88	-2,16	-0,66
Maximum	3,16	1,65	1,27	3,92	3,90	1,15	6,56
Prům. abs. odchylka	0,62	0,35	0,90	0,99	1,07	0,40	1,80



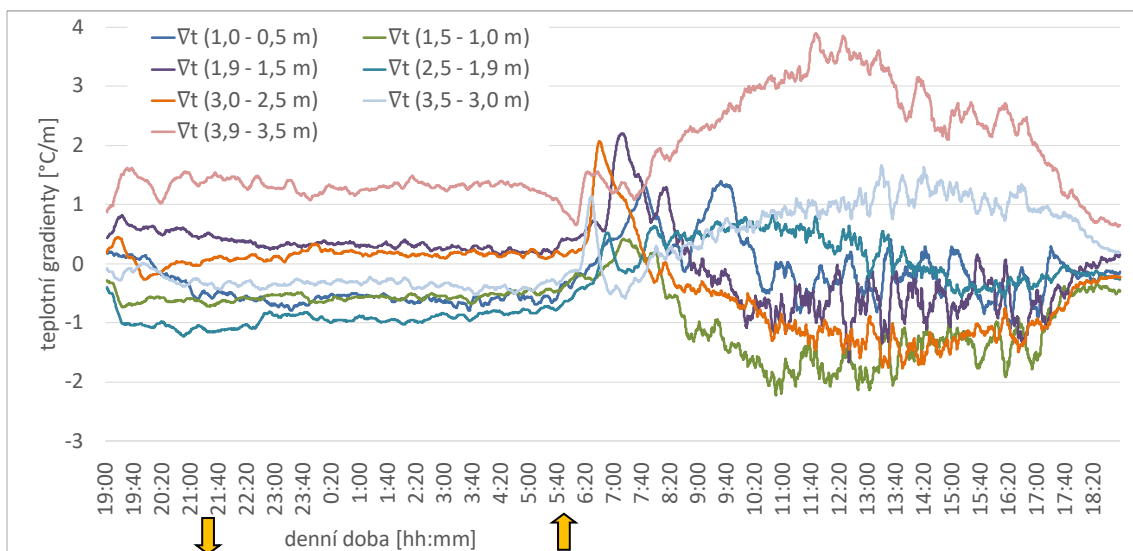
8.5.3 Výsledky nad asfaltem

V následujících grafech Obr. 69 a Obr. 70 jsou obdobným způsobem prezentována data určená nad asfaltovým povrchem dne 25. 7. 2019.



Obr. 69 Průběh teploty 25. 7. 2019

Oproti předchozímu grafu vidíme výraznější téměř ukázkovou stratifikaci v noční době a celkově graf vykazuje větší rozvrstvení teploty. Tento rozdíl se dá přičíst na vrub homogenitě asfaltu, která je oproti travnatému povrchu přeci jen vyšší. Díky tomu zde nebudou nastávat tak často náhodné jevy anebo budou potlačeny dominantním vlivem podkladu.



Obr. 70 Teplotní gradienty určené 25. 7. 2019



Z tohoto grafu jasně vidíme rozdíl oproti měření nad travnatým povrchem. Zatímco u travnatého povrchu je vidět vliv terénu jen v první úrovni, tak u měření nad asfaltem vidíme záporný gradient prakticky až do výšky 3 metrů. Stejně tak vidíme, že se úroveň vyrovnání teplot (místo, kde je gradient téměř nulový) posunula do výšky okolo 1,7 m. Největší rozdíl však vnímáme v době východu slunce (okolo 6 hodiny), kdy se začne zahřívat asphalt a dochází k prudkému nárůstu gradientů. V tomto turbulentním období je prakticky nemožné předpovídat gradienty a celkové chování atmosféry.

Je zajímavé, že gradienty určené nad travnatou plochou jsou obvykle vyšší než nad asfaltem. I tento jev je možné z části přičíst na vrub asfaltu, který celý prostor v jistém smyslu homogenizuje. Navíc bylo z praktických důvodů měřeno v jiné dny, a tak přesnější komparace výsledků nemá reálný význam.

Statistická data popisující změřené teplotní gradienty pro toto měření jsou uvedena v Tab. 24.

Tab. 24 Statistická data souboru

Kritérium	$\Delta T t$ [°C/m]						
	1,0 - 0,5 m	1,5 - 1,0 m	1,9 - 1,5 m	2,5 - 1,9 m	3,0 - 2,5 m	3,5 - 3,0 m	3,9 - 3,5 m
Minimum	-1,10	-2,23	-1,67	-1,23	-1,77	-0,60	0,63
Maximum	1,40	0,42	2,21	0,82	2,07	1,66	3,89
Prům. abs. odchylka	0,38	0,47	0,50	0,53	0,59	0,58	0,70

8.5.4 Závěry experimentu

Uvážíme-li přesnost senzorů, pak jsou určené teplotní gradienty během dne prokazatelné a v rámci denního maxima a odpoledne velmi výrazné. V horkých dnech, jako jsou tyto, je nutné uvažovat také sálání povrchu, jak je vidět u obou dní. Teplotní stratifikace přízemní úrovně atmosféry je zřejmě výraznější nad homogenním asfaltovým povrchem než nad obecně proměnlivým trávníkem.

Princip stratifikace byl potvrzen spíše ve vyšších polohách, ale je potřeba uvést, že nelze vzít jako platné obvykle citované „pravidlo“, že čím vyšší výška, tím vyšší teplota. Vliv podkladu je v těchto nižších úrovních natolik významný, že prakticky převyšuje nad obecným pojetím stratifikace.

Pro případné praktické aplikace je potřeba aktivně vyhledávat výškovou vrstvu, ve které dochází k vynulování teplotního gradientu (v našem případě mezi výškami 1,3 až 1,7 m nad terénem), jelikož v této vrstvě by mělo docházet k nejmenšímu zatížení měření chybami způsobenými refrakcí.

8.6 Experiment numerického potlačení vlivu refrakce

Předchozí experimenty přinášejí praktická data a lze z nich určit hodnotné závěry z hlediska metody pro potlačování vlivu refrakce. Fyzikální základ výpočtu (DRPV) je sice platný, nicméně metoda je dosti komplikovaná a rozsáhlá, a tak celková přesnost iteračního postupu by mohla být nízká. To prakticky nebylo možné v daných experimentech ověřit. Z tohoto důvodu byl proveden experiment, jehož cílem bylo numericky ověřit obecnou platnost výpočtů a navržené metody jako takové. Výchozím



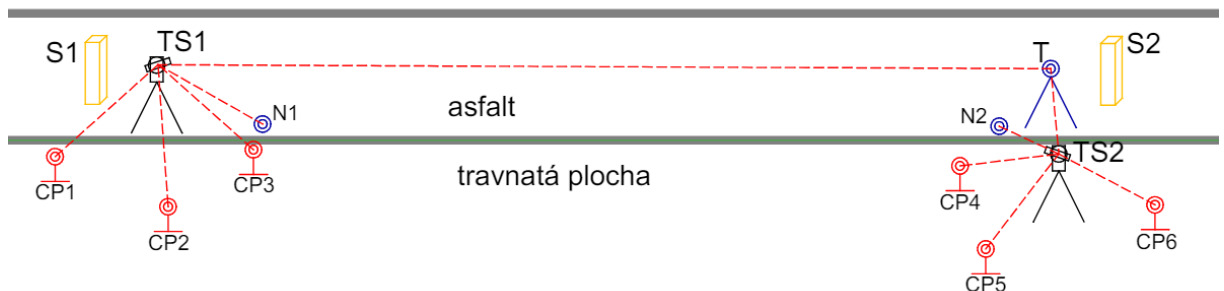
předpokladem bylo navržení takového experimentu, který by umožňoval porovnat měřené převýšení s vlivem refrakce s numerickým výpočtem vlivu refrakce pomocí DRPV.

8.6.1 Nastavení experimentu

Experiment probíhal od 10. 9. 2021 13:00 do 11. 9. 2021 14:00 (SEČ). Oba dny byly vzhledem k ročnímu období relativně slunné, nicméně v průběhu měření došlo i k drobným dešťovým přeháňkám.

Pro realizaci experimentu byl zvolen park I. Gándhiové v okolí budovy Fakulty stavební ČVUT. Samotná dráha paprsku probíhala nad asfaltovým chodníkem pro zaručení stabilnějšího vlivu prostředí (především tepelné vyzařování materiálu na povrchu).

Při určování velikosti vlivu refrakce je zásadní potlačení dalších vlivů. V tomto případě šlo zejména o potlačení změny výšky přístroje a cíle (propadnutí nohou stativu, náklonu). Z toho důvodu byl navržen postup, kdy se pro každou etapu určí nová výška stroje i cíle. Prakticky toho bylo dosaženo měřením na blízkou trojici stabilních odrazných hranolů (reálný vliv refrakce je zanedbatelný). Následný výpočet je pak realizován s uvážením těchto drobných změn. Obdobného výsledku by bylo možné dosáhnout také měřením z pilířů nucené centrace. Rozmístění přístrojů a pomůcek je znázorněno na Obr. 71.



Obr. 71 Rozmístění přístrojů a pomůcek

Totální stanice (TS1 – Trimble S6 HP) byla umístěna na asfaltovém chodníku u jeho hrany a sloužila k měření vzdáleného určovaného cíle (T). Zároveň v každé etapě kontrolovala svou stabilitu a případné posuny měřením na trojici blízkých kontrolních bodů (CP1 – CP3), které byly osazeny na nízkých dřevěných kolících zatlučených v zemi na trávníku. V blízkosti TS1 byla umístěna soustava teplotních čidel osazených na stínící a nosné konstrukci (S1). Cílový všesměrný hranol (T) byl umístěn na stativu nad asfaltem a jeho stabilita byla kontrolována totální stanicí (TS2 – Trimble S9 HP). Samotná TS2 byla postavena na trávníku v blízkosti cílového hranolu (T). TS2 také prováděla periodické kontroly stability obou stativů (T i TS2) měřením na trojici blízkých kontrolních bodů (CP4 – CP6) řešených stejně jako CP1. Poblíž cíle T se nacházela druhá soustava teplotních čidel S2.

Pro potřeby výpočtů byla navržena lokální souřadnicová síť s rovnoběžkou s osou X procházející spojnici TS1 a T (optickým středem hranolu a TS). Měřítkový faktor byl zvolen 1. Souřadnice v nulté etapě bodů TS1 a T jsou uvedeny v Tab. 25.



Tab. 25 Souřadnice TS1 a T v 0. etapě

Číslo bodu	Y [m]	X [m]	Z [m]
TS1	1000,000	1000,000	100,000
T	1000,000	1170,521	104,741

Pro potřeby kontrolního zaměření byly v blízkém okolí TS1 a TS2 zaměřeny totálními stanicemi body N1 a N2, mezi kterými bylo následně určeno převýšení nivelací. Jelikož byly body pouze několik metrů vzdálené od TS není zde třeba uvažovat vliv refrakce.

8.6.2 Měření

Měření experimentu probíhalo v roce 2021 v měsíci září v rozsahu jednoho dne (cca 25 hodin) s intervalem etap měření TS cca 11 minut. Současně bylo měřeno 2 sadami teplotních čidel umístěných na stínících a nosných konstrukcích rozmístěných na začátku a na noci měření trajektorie.

Čas měření všech pomůcek byl sjednocen na SEČ a dále bylo potřeba provést synchronizaci časů měření na čas měření na bod T v každé etapě.

Měření totální stanice TS1 probíhalo ve dvou polohách dalekohledu v intervalu etapy cca 11 minut (v závislosti na rychlosti zaměření osnovy). Tím bylo provedeno 126 etap měření na bod T (určení výšky bodu T zatížené vlivem refrakce).

Vzhledem k tomu, že se nepředpokládaly významné posuny stativů, bylo možné provést interpolaci i v případě periodického kontrolního měření TS2, které probíhalo cca jednou za 10 minut. Následné výpočty ukázaly na velmi dobrou výškovou stabilitu stativů (v řádu nižších desetin milimetrů v rámci etapy) a velmi pozvolný trend, což potvrdilo, že lineární interpolace je pro daný účel dostačující.

Pro měřicí aparatury k určování teplotního gradientu (vybavené odporovými čidly 6.1.1.2) byla interpolace v čase prováděna ve výrazně jemnějších intervalech a to po 10 sekundách. Zde byl kladen důraz na co nejvyšší reálnost změřené hodnoty v přesný čas měření převýšení. Zaznamenané hodnoty prokazují, že vývoj teploty v rámci 10 s zpravidla nepřekračuje 0,2 °C, což je prakticky na hranici přesnosti teplotních čidel. Následně bylo možné z takto určených teplot a teplotních gradientů (a dalších měřených hodnot) vypočítat pomocí DRPV očekávaný zdánlivý vertikální posun cíle T.

Dále bylo potřeba určit správné (bez vlivu refrakce) převýšení mezi TS1 a T. K tomu sloužilo zaměření nivelačního pořadu mezi stabilizovanými body N1 a N2 pomocí přístroje Trimble DiNi.

Měření všech přístrojů bylo třeba časově synchronizovat na čas měření TS1, toho bylo docíleno prostou lineární interpolací.

Po skončení experimentu bylo ještě uskutečněno doplňkové měření tachymetrie, aby byl určen výškový model terénu, který se následně použil pro simulaci průchodu atmosférou pomocí DRPV.



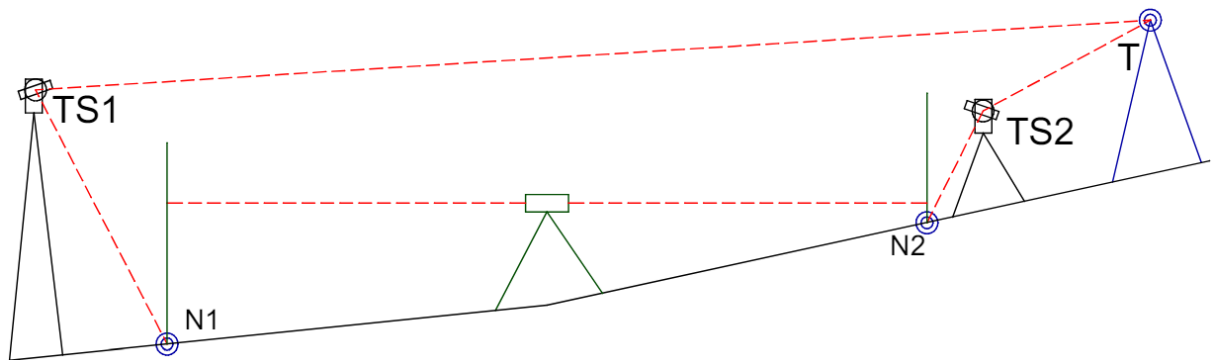
8.6.3 Výsledky měření

V této kapitole budou postupně shrnuty výsledky jednotlivých měření a jejich vzájemné vazby. Pro lepší představu pozadí experimentu jsou zde prezentovány i dílčí měřené či vypočítané veličiny (např. měřené teploty a gradienty).

8.6.3.1 Určení převýšení nivelačním přístrojem

Aby bylo možné zjistit okamžitý vliv refrakce na měření totální stanicí, tak bylo nutné porovnat převýšení určené TS1 s převýšením určeným nivelací (bez vlivu refrakce). K tomu bylo potřeba realizovat dva stabilní body N1 a N2, které byly umístěny poblíž TS1 a T. Mezi těmito body byl třikrát měřen nivelační pořad. Celkové správné převýšení \bar{h} mezi body TS1 a T je pak dáno součtem dílčích převýšení, jak je zobrazeno na Obr. 72 a uvedeno v následujícím vztahu

$$\bar{h} = h_{TS1,N1_i} + h_{N1,N2} + h_{N2,TS2} + h_{TS2,T_i}. \quad (8.4)$$



Obr. 72 Schéma výpočtu převýšení pomocí nivelace

Jelikož byly body N1 a N2 pouze několik metrů vzdálené od TS není u převýšení určených trigonometricky ($h_{TS1,N1_i}$ a h_{TS2,T_i}) třeba uvažovat vliv refrakce. Vzhledem k tomu, že jsou v rámci experimentu uvažovány případné změny výšky stativů TS1 a T, tak i tato převýšení nabývají pro každou etapu jiné hodnoty.

Při měření byly použity celistvé dvoumetrové nivelační latě s digitálním kódem a přístroj byl nastaven na dvojitý odečet a kontrolu mezního pohybu latě. Výsledné průměrné převýšení $h_{N1,N2} = 4,4680 \text{ m}$. Největší rozdíl od průměru (0,4 mm) vykazovalo první měření. Výsledná směrodatná odchylka převýšení \bar{h} vyplývající z přesnosti přístrojů a počtu opakování pak odpovídá cca 0,7 mm.

Abychom mohli porovnávat převýšení určené nivelací a převýšení určené totální stanicí, je třeba ještě uvážit vliv zakřivení Země. Ten se, jak známo, negativně promítne do trigonometricky určeného převýšení, ale u převýšení určeného nivelací ze středu se neprojeví. Z tohoto důvodu bylo určené převýšení totální stanicí matematicky opraveno o konstantu 2,28 mm.



8.6.3.2 Tachymetrie

Pro přesné určení výšky dráhy paprsku nad terénem bylo okolí experimentu tachymetricky zaměřeno pomocí totální stanice v již popsaném místním systému. Vzhledem k doplňkovému významu určovaných bodů bylo měřeno jen v jedné poloze dalekohledu na 360° odrazný hranol. Očekávaná přesnost výšky určovaných bodů je 1 až 2 cm.

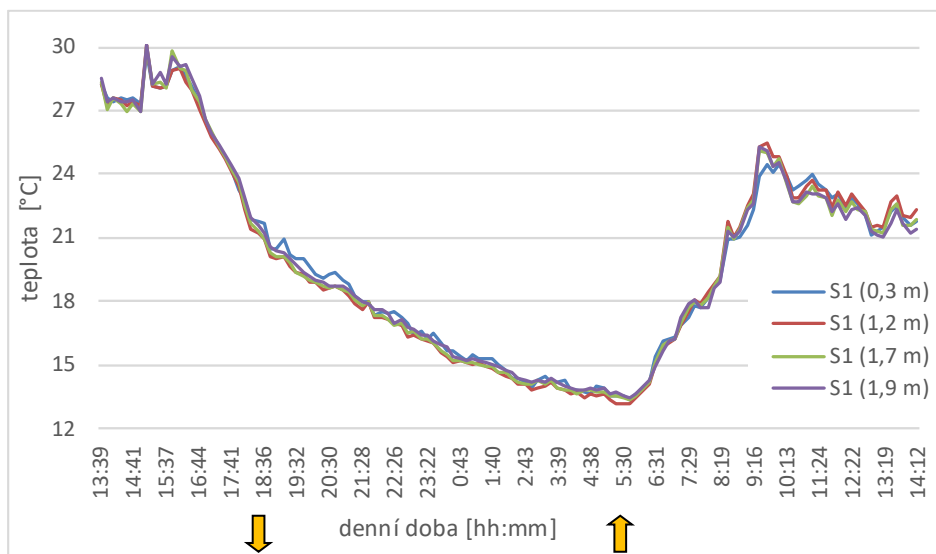
Z naměřených bodů byl následně vypočítán model mash. Výška dráhy paprsku nad terénem byla určena jako svislá vzdálenost bodu dráhy paprsku od mash modelu.

8.6.3.3 Výsledky měření teplot

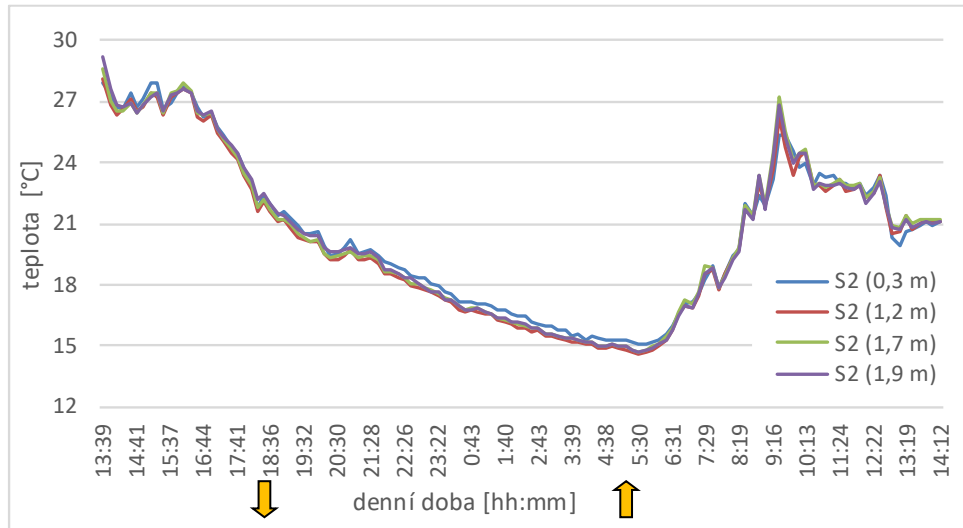
Pomocí dvou sad senzorů S1 a S2 byly měřeny teploty během experimentu s intervalem 10 sekund. Tyto teploty byly následně přepočítány na přesný čas měření TS1. Toho bylo docíleno interpolací obou sad senzorů ($t_{i,S1}$ a $t_{i,S2}$) v čase i měření totální stanicí TS1

$$t_{i,k,S1} = t_{i+n,S1} + \frac{t_{m,k,S1} - t_{n,k,S1}}{m - n} \cdot (i - n), \quad (8.5)$$

kde k je konkrétní pozice senzoru (konkrétní senzor), hodnoty n a m jsou časy nejbližšího měření senzoru před a po měření TS1 v čase i . Pro teploty určované senzory S2 je řešení obdobné. Výsledné teploty v rámci etap jsou prezentovány v grafech Obr. 73 a Obr. 74.

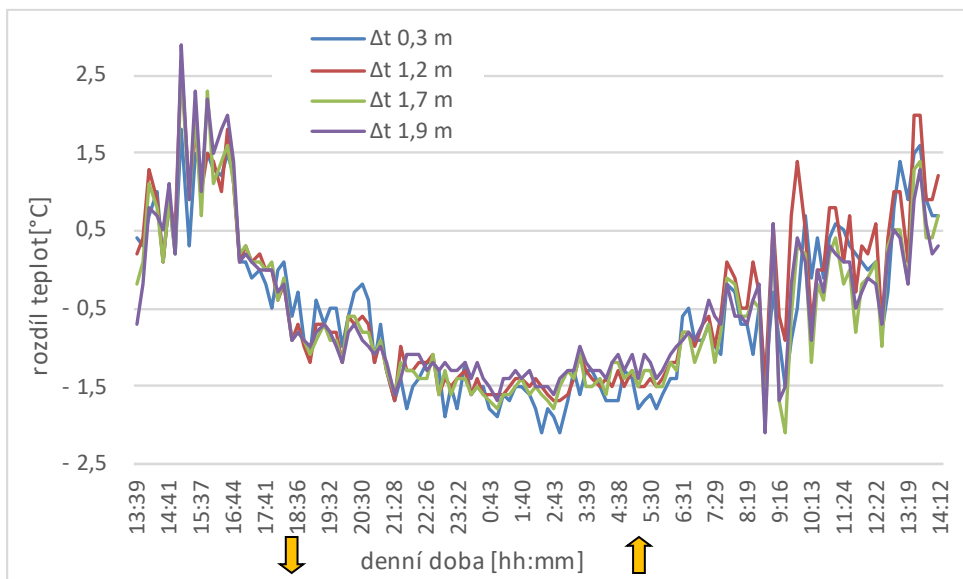


Obr. 73 Teploty měřené sadou senzorů S1



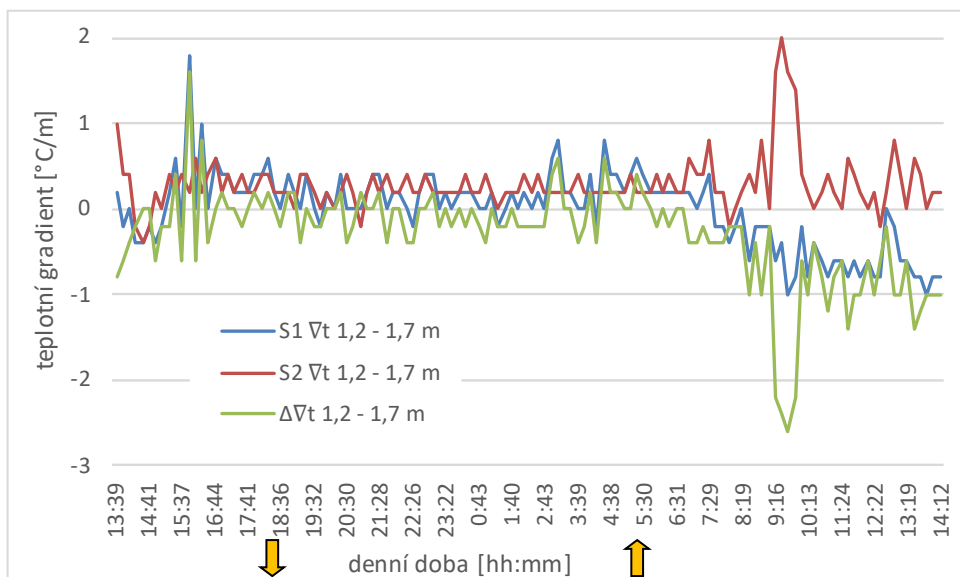
Obr. 74 Teploty měřené sadou senzorů S2

Z grafů můžeme poznat, že denní teploty dosahovaly až ke 30 °C, což je pro dané roční období velmi vysoké. Během noci teploty klesly zhruba na 14 °C. Podobnost obou grafů je zjevná, přesto je jasné, že teplota se i na vzdálenost cca 170 metrů může výrazně lišit. To je prezentováno na Obr. 75.



Obr. 75 Rozdíly teplot mezi S1 a S2

Nejvyšší teplotní rozdíly (téměř 3 °C) pro jednotlivé senzory byly naměřeny v první části experimentu, kdy také byla obecně nejvyšší teplota. Důvodem pravděpodobně je relativní zastínění oblasti v okolí senzorů S2 okolními budovami a vegetací. V noci je jasně vidět systematický rozdíl o hodnotě cca 1,5 °C, který je dán přirozeným vlivem prostředí v okolí senzorů. Pro následující výpočet je nejdůležitější teplotní gradient v oblasti 1,2 až 1,7 m nad terénem. V této oblasti procházela naprostá většina dráhy paprsku. Gradienty a jejich rozdíl pro tento interval jsou zobrazeny na Obr. 76.

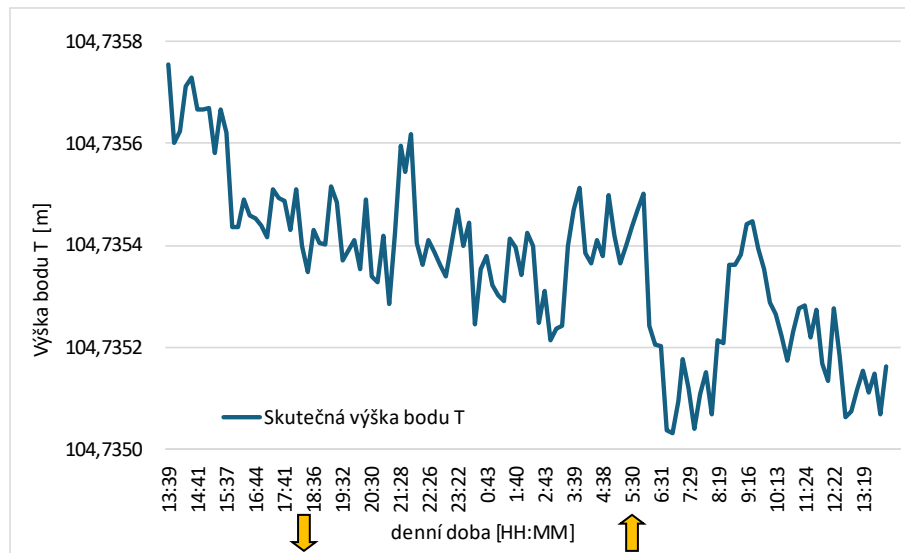


Obr. 76 Teplotní gradienty pro S1 a S2 (výška 1,2 m až 1,7 m) a jejich rozdíl

Ve většině případů dosahují teplotní gradienty v rámci experimentu hodnot pod 1 °C/m, což jsou relativně malé hodnoty (viz pokusy 8.3). V jiných ročních obdobích nejsou neobvyklé ani gradienty okolo hodnoty 2–5 °C/m. Zajímavý je také jejich rozdíl, který dokládá nutnost měřit teplotu (resp. její vertikální gradient) minimálně na obou koncích dráhy paprsku (u TS1 a T). Teplotní výkyv u senzorů S2 v době okolo 9:00 až 10:00 nebyl vůbec detekován senzory S1. Opět je zde patrný výrazný nepředvídatelný přirozený vliv prostředí, což zásadně ohrožuje možnosti zdárného výpočtu vlivu refrakce.

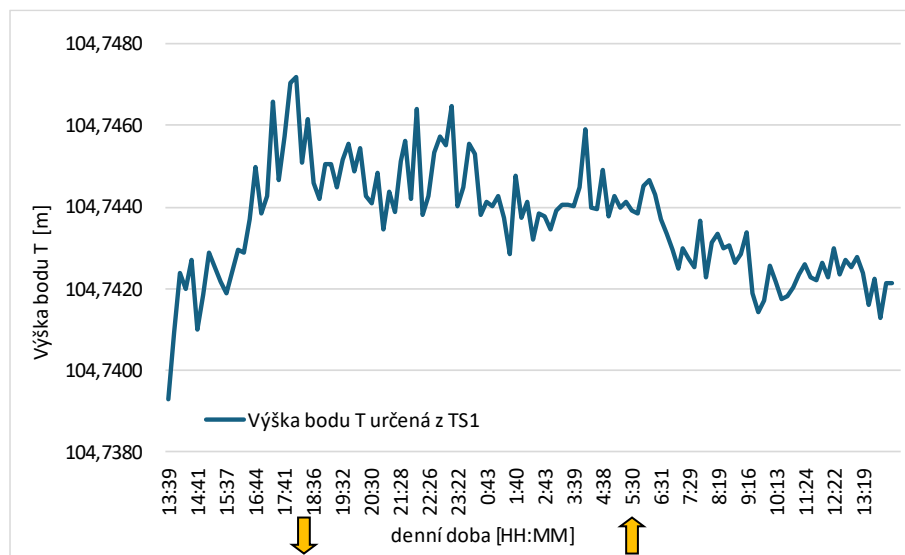
8.6.3.4 Výsledky měření totální stanicí

Měření totálními stanicemi probíhalo ve dvou polohách měřených ihned za sebou, přičemž měřeny byly vždy kontrolní pevné body CP1–CP3 (případně u TS2 CP4–CP6) a pozorovaný cíl T. Z měření na kontrolní body byla pro každou etapu určena výška TS1 a T a tím byl uvážen vliv změny stavivů, který v průběhu experimentu nepřesáhl 1 mm. Určená skutečná výška bodu T (vypočítaná z měření nivelace a na body N1 a N2 dle vztahu (8.4) a její vývoj v etapách je zobrazena na Obr. 77.



Obr. 77 Správná výška bodu T pro každou z etap

Pro každou etapu měření TS1 byla dále trigonometricky vypočítána výška (převýšení) bodu T uvažující vliv pohybu stativu a zavedení opravy ze zakřivení Země. Takto vypočítané převýšení se v etapách měnilo. Díky cílenému potlačení dalších nežádoucích vlivů jsou tyto rozdíly dány vlivem aktuálního stavu prostředí = refrakcí. Určená zdánlivá výška bodu T je zobrazena na Obr. 78.



Obr. 78 Zdánlivá výška bodu T pro každou z etap

Z obou předchozích grafů je patrné, že jsou rozdílné. Zatímco reálná výška bodu T téměř po celou dobu experimentu pozvolna klesala, zdánlivá výška vykazovala nejprve zvýšení, pak pokles a uklidnění.

Rozdílem zdánlivých výšek (převýšení) určených v jednotlivých etapách bychom mohli získat změnu vlivu refrakce mezi etapami. Nicméně bez znalosti obecně nenulové velikosti chyby, kterou působí refrakce v první etapě, by nebylo možné určit celkovou velikost vlivu refrakce. Zde využijeme výšky určené nivelací (dle vztahu

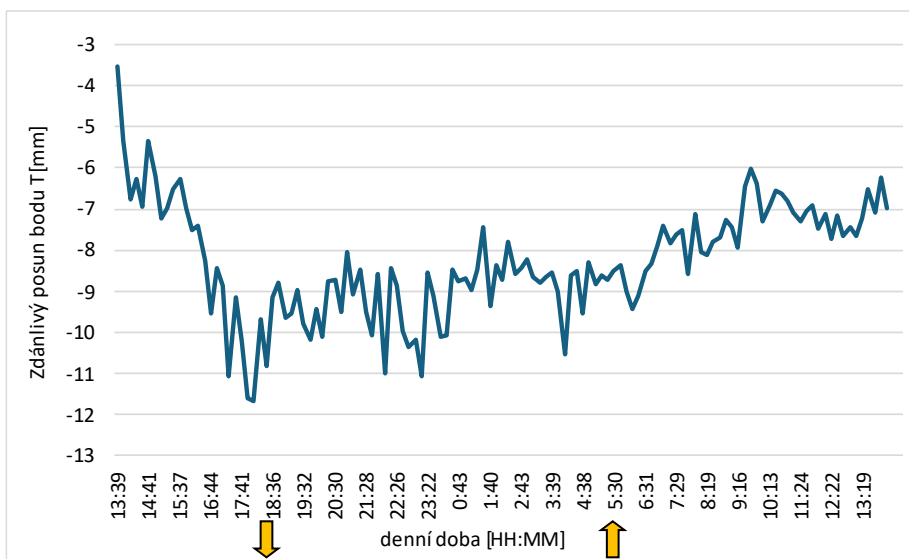


(8.4)), kterou, jak již bylo dříve vysvětleno, můžeme považovat za správnou (bez vlivu refrakce).

Rozdílem převýšení určeného nivelací \bar{h} a převýšení určeného měřením totální stanicí h_i v dané etapě i získáme skutečnou hodnotu zdánlivého posunu ΔH_i , kterou způsobuje refrakce v daný okamžik

$$\Delta H_i = \bar{h} - h_i. \quad (8.6)$$

Zdánlivý posun bodu T napříč etapami je zobrazen v grafu Obr. 78.



Obr. 79 Zdánlivý posun bodu T

Na obrázku Obr. 79 je vidět reálný vliv refrakce pro každou z etap. Je překvapivé, že dosahuje tak velkých hodnot, například v období okolo 17 až 18 hodin vykazuje zdánlivý posun téměř -12 mm. Následně během noci se ustaluje na hodnotě okolo -9 mm (ačkoli jsou zde patrné velké výkyvy až v rozsahu 2 mm). Od východu slunce (cca 5:30) vidíme stoupající trend až k začátku deště (cca 9:30), kdy dochází k ustálení na hodnotě okolo -7 mm až do konce experimentu.

Z hodnot je zřejmé, že neuvážení vlivu refrakce by v tomto případě znamenalo výrazné zhoršení přesnosti měřených převýšení. I v případě etapového měření, které je z důvodu hledání změn mezi etapami obecně lepší pro potlačování vlivu refrakce, by zde nastala komplikace, jelikož je vliv refrakce výrazně proměnný a nepředvídatelný.

8.6.3.5 Rozbory přesnosti pro totální stanici a nivelaci

Aby bylo možné prokázat vliv refrakce, tak byly spočítány rozbory přesnosti pro určované převýšení. Charakteristiky přesnosti pro měřené veličiny měřené totálními stanicemi jsou uvedeny v Tab. 26.



Tab. 26 Přesnosti měření totálními stanicemi

Veličina	Symbol	TS Trimble S6	TS Trimble S9
Dálkoměr [mm] (hranolové měření)	σ_d	$1 + 1 \text{ ppm} \cdot d$	$0,8 + 1 \text{ ppm} \cdot d$
Úhlové měření [gon]	σ_z	0,0003	0,0003

Z daných přesností totální stanice lze aplikací zákona hromadění směrodatných odchylek spočítat očekávanou přesnost určení převýšení bodu T.

Pro měřenou šikmou vzdálenost $sd = 170,587$ m je směrodatná odchylka délky $\sigma_d = 1,17$ mm, měřený zenitový úhel $z = 98,2313$ gon s danou směrodatnou odchylkou σ_z . Převýšení určené totální stanicí h získáme dosazením do vztahu

$$h = \cos(z) \cdot sd. \quad (8.7)$$

Následnou aplikací zákona přenášení směrodatných odchylek získáme směrodatnou odchylku převýšení $\sigma_{\Delta H}$

$$\sigma_h = \sqrt{(-\sin(z) \cdot sd)^2 \cdot \sigma_z^2 \cdot \left(\frac{\pi}{200}\right)^2 + (\cos(z))^2 \cdot \sigma_d^2} = 0,80 \text{ mm}. \quad (8.8)$$

Dále je možné vypočítat směrodatnou odchylku převýšení určeného nivelací a směrodatnou odchylku rozdílu těchto převýšení. Výpočty se řídí vztahem odvozeným z Obr. 70.

Bylo provedeno trojí nezávislé určení převýšení bodů N1 a N2 pomocí nivelace s výběrovou směrodatnou odchylkou průměru měřených převýšení $S_{h_{N1,N2}} = 0,20$ mm a nominální směrodatná odchylka měřeného převýšení $\sigma_{h_{N1,N2}} = 0,12$ mm (délka pořadu cca 172 m). Následující výpočty budou prováděny s výběrovou směrodatnou odchylkou $S_{h_{N1,N2}}$. Ostatní převýšení jsou určena trigonometricky pomocí totální stanice (dle obrázku Obr. 72) se směrodatnou odchylkou $\sigma_{h_{TS1,N1}} = \sigma_{h_{N2,TS2}} = 0,24$ mm (pro měření na body N1 a N2, $sd \approx 10$ m a $z \approx 115$ gon) a $\sigma_{h_{TS2,T}} = 0,08$ mm (pro měření na bod T, $sd \approx 5$ m a $z \approx 105$ gon).

Celková směrodatná odchylka tohoto převýšení $\sigma_{\Delta H_{niv}}$ se vypočítá

$$\sigma_{\bar{h}} = \sqrt{\sigma_{h_N}^2 + S_{h_{N1,N2}}^2 + \sigma_N^2 + \sigma_{h_T}^2} = 0,41 \text{ mm}. \quad (8.9)$$

Mezní rozdíl $max\Delta_h$ s koeficientem spolehlivosti $u_p = 2$ pro převýšení nivelované \bar{h} a převýšení měřené pomocí TS h se vypočítá jako

$$max\Delta_h = u_p \cdot \sqrt{\sigma_{\bar{h}}^2 + \sigma_h^2} = 1,80 \text{ mm}. \quad (8.10)$$

Překročení mezního rozdílu v experimentu dokazuje prokazatelnost vlivu refrakce.



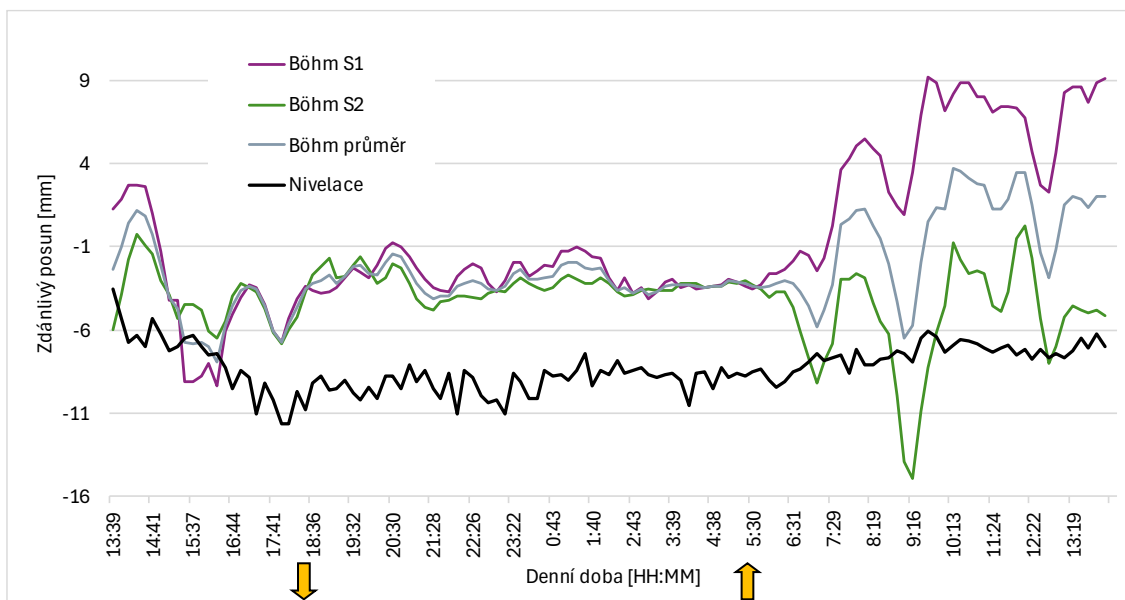
8.6.4 Výpočet posunů

V tuto chvíli známe skutečné hodnoty zdánlivých posunů, které jsme získali rozdílem převýšení měřeného totální stanicí a převýšení určeného nivelací. Existují však výše popsané způsoby, jak ze znalosti parametrů atmosféry (teploty, tlaku, gradientů, ...) určit vliv refrakce numericky. Prakticky jde o výpočet pomocí dvou jednoduchých fyzikálních vzorců (Kharaghani a Böhm – kapitola 7.2.1) a iterativního přístupu DRPV (kapitola 7.2.1.4). V následujících řádcích jsou uvedeny postupy výpočtu a jejich porovnání.

Pro tyto metody bylo potřeba nejprve připravit měřená teplotní data.

8.6.4.1 Böhmův vzorec

Z časově interpolovaných teplot (a z nich určených gradientů) je možné snadno vypočítat vliv refrakce (zdánlivý posun) pomocí zjednodušeného vztahu prof. Böhma. Jedinou otázkou je, jaký teplotní gradient použít. Jelikož máme měření ze dvou souprav, je možné použít gradient určený na první (S1), na druhé (S2) nebo jejich průměr. Všechny varianty a jejich porovnání se zdánlivým posunem (určeným pomocí nivelace) jsou uvedeny v Obr. 80.



Obr. 80 Porovnání zdánlivých posunů bodu T a Böhmova vzorce

Graf odhaluje, že ačkoli jsou si jednotlivé výpočty blízké (alespoň v prvních dvou třetinách etap), tak nejsou blízké reálnému zdánlivému posunu. Navíc je zde patrný velký rozdíl mezi výpočty v poslední třetině, který logicky plyne z větších rozdílů měřených teplot (gradientů) na obou soupravách. Tato fakta jasně ukazují na naprostou nedostatečnost popsaní atmosféry pomocí dvou souprav s čidly. Otázkou zůstává, zda by bylo dosaženo lepších výsledků, pokud by byla například přidána další souprava ve středu trajektorie.

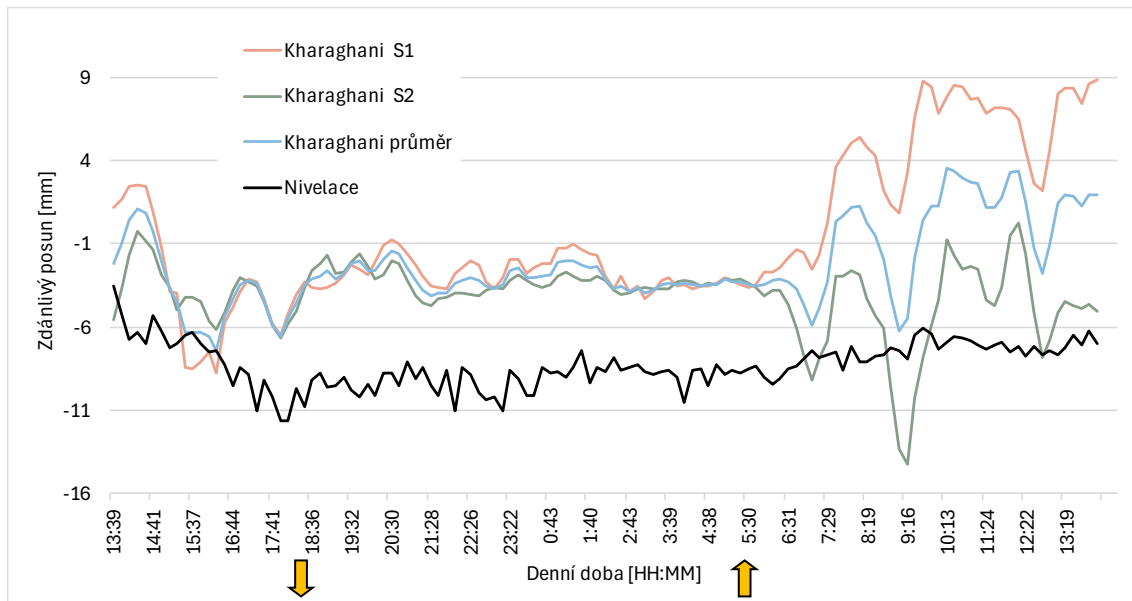
Prakticky nemá význam uvažovat o využití tohoto výpočtu pro zavádění oprav nebo alespoň pro odhad vhodné doby měření, jelikož vypočítané posuny jsou naprosto



odlišné od těch určených nivelací. To dokazuje i korelační koeficient spočítaný z varianty výpočtu za použití průměrného teplotního gradientu a nivelovaného zdánlivého posunu, který je roven 0,43.

8.6.4.2 Kharaghaniho vztah

Přihlédneme-li k tomu, že předchozí výpočet neposkytl správné hodnoty, tak je vzhledem k provázanosti obou výpočtů logické, že i tento postup nepovede ke kvalitním výsledkům. Opět bylo výpočet proveden pro variantu zahrnující měření z S1, S2 a průměru obou. Výsledky jsou prezentovány v Obr. 81.



Obr. 81 Porovnání zdánlivých posunů bodu T a Kharaghaniho vztahu

Výsledky jsou téměř totožné s výsledky výpočtu pomocí vzorce prof. Böhma (korelační koeficient 0,99), ani zde není možné uvažovat o praktickém použití pro potlačení vlivu refrakce. Korelační koeficient vztažený k nivelovanému zdánlivému posunu je tentokrát 0,45, což je stále spíše náhodná závislost.

8.6.4.3 DRPV

Poslední výpočetní metodou umožňující určit zdánlivý posun z měření parametrů atmosféry je metoda DRPV, která je několikanásobně složitější než předchozí vzorce. Oproti nim umožňuje výpočet nad jakýmkoli teplotním (gradientním) polem, skrze které paprsek prochází, a tím by měla být vhodnější pro popsání průchodu paprsku prostředím popsaným pomocí dvou souprav. Pro její iterativní výpočet je stěžejní určit v každém bodě dráhy teplotu (teplotní gradient, tlak, ...), a tím nastavit podmínky pro výpočet.

Pro výpočet byl zvolen krok iterace 3 mm, jeho velikost byla zkontrolována výpočtem uvažující jeho variace (1 cm a 1 mm), přičemž rozdíly mezi výpočty jsou prakticky zanedbatelné. Atmosférický tlak potřebný pro výpočet byl určen pouze jednou a následně zkontrolován po cca 5 hodinách. V průběhu experimentu nedošlo k významným změnám tlaku, a tak byly všechny etapy počítány s jednou hodnotou.



8.6.4.3.1 Určení teploty a gradientu v konkrétním bodě dráhy

Jak již bylo vzpomenuto dříve, po změření teplot na sadách senzorů S1 a S2 byl proveden přepočít na přesnou dobu měření TS1, dále bylo nutné vypočítat konkrétní teplotu a teplotní gradient pro každý bod dráhy (v každé etapě). Základní myšlenkou pro výpočet byl předpoklad, že gradient v přízemní úrovni atmosféry závisí především na výšce nad terénem (což ukazovala předchozí pozorování) a následně na pozici v horizontálním směru. Pro přehlednost si zavedeme pomocné parametry uvedené v Tab. 27.

Tab. 27 Pomocné parametry

Parametr	Symbol
Vzdálenost konkrétního bodu dráhy od TS1	d
Výška konkrétního bodu dráhy nad terénem	h
Výška senzoru na konstrukci (výška nad zemí) (0,3 m, 1,2 m, 1,7 m, 1,9 m)	c

Pro výpočet jedné teploty konkrétního senzoru $t_{d,c}$ v daném bodě dráhy z hlediska polohy použijeme opět prosté lineární interpolace

$$t_{d,c} = t_{c,S1} + \frac{t_{c,S2} - t_{c,S1}}{D} \cdot (d), \quad (8.11)$$

kde D je celková dráha paprsku (cca 170 m) a d je aktuální bod dráhy paprsku (vzdálenost od TS1). Tímto způsobem získáme pro každou výškovou pozici senzoru jednu teplotu, která je funkcí vzdálenosti d .

Dalším krokem je interpolace teploty dle výšky. Nejprve je potřeba vypočítat pro bod dráhy d výšku nad terénem h . K tomuto sloužil model terénu mash dříve určený tachymetricky. Jde o svislou vzdálenost bodu dráhy od povrchu modelu.

Pro hodnotu h se následně ze znalosti dvou sousedních senzorů interpoluje výsledná teplota t_h v konkrétním bodě dráhy

$$t_h = t_{d,c1} + \frac{t_{d,c2} - t_{d,c1}}{c2 - c1} \cdot (h - c1), \quad (8.12)$$

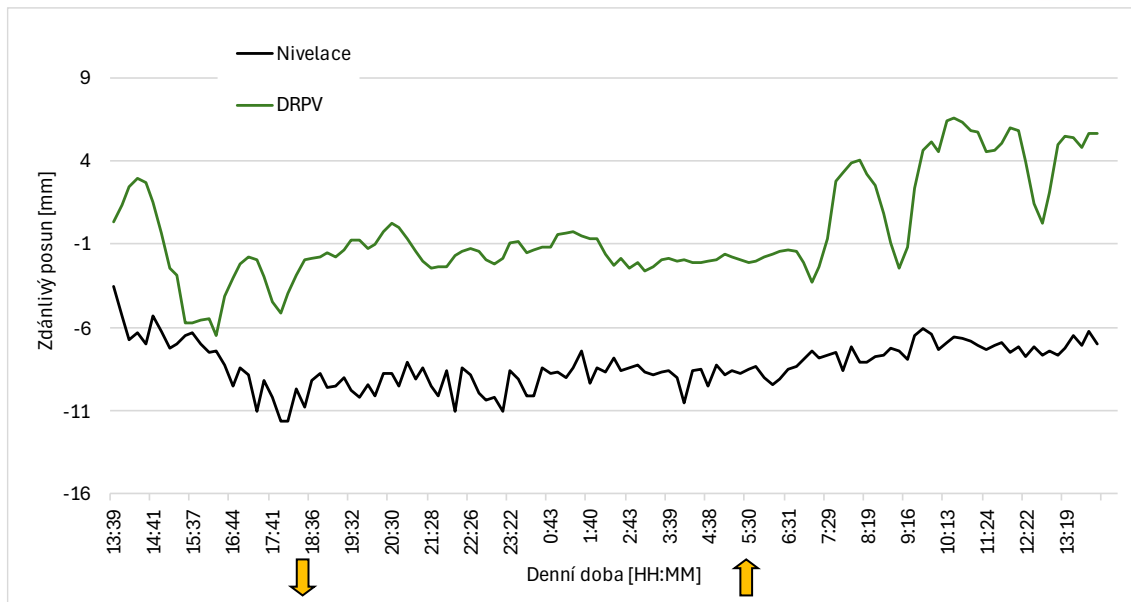
kde $c1, c2$ jsou výšky čidel mezi kterými leží bod trajektorie o výšce h . Výsledný vertikální teplotní gradient v bodě ∇t lze pak spočítat obdobně

$$\nabla t = \frac{t_{d,c2} - t_{d,c1}}{c2 - c1}. \quad (8.13)$$

Tyto hodnoty následně vstupovaly do výpočtu průchodu paprsku nehomogenním prostředím DRPV.

8.6.4.3.2 Výsledky DRPV

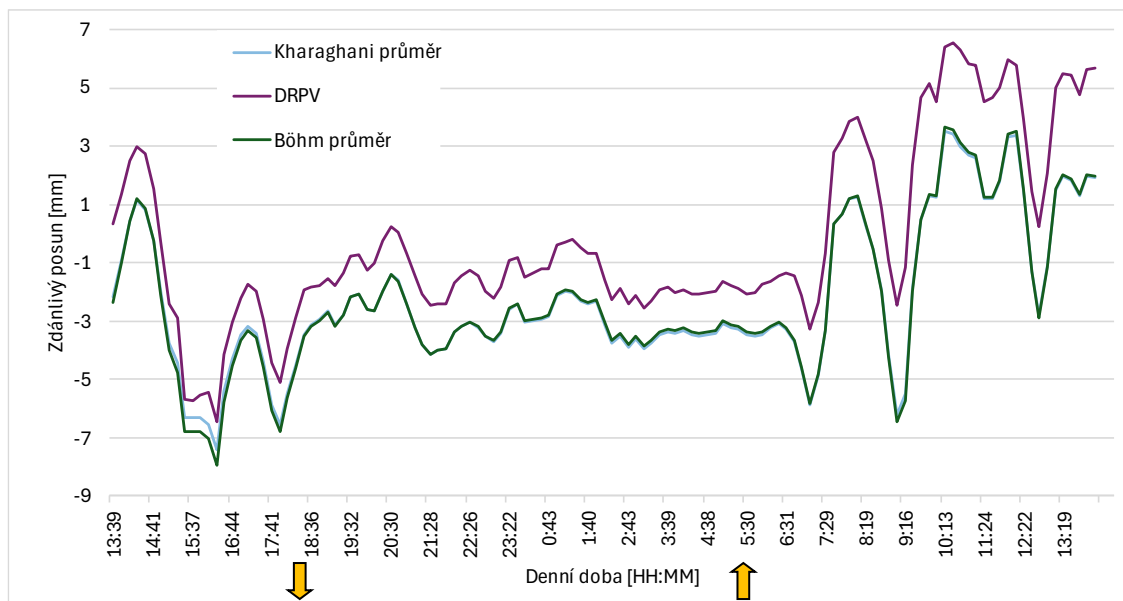
Simulací průchodu (popsanou v 7.2.1.4.1) prostředím definovaným pomocí teplotního (gradientního) pole pro každou z etap a uvážením jednotlivých změn výšek stativů bylo možné určit vertikální zdánlivé posuny. Jejich velikosti jsou prezentovány v grafu Obr. 82 společně s nivelovanými (správnými) zdánlivými posuny.



Obr. 82 Porovnání zdánlivých posunů bodu T a DRPV

Výsledný graf potvrzuje podezření vyplývající z výsledků jednoduchých vzorců – pro podchycení vlivu refrakce není dostačující měření teplot (gradientů) na dvou místech takto dlouhé dráhy. Výsledné simulované zdánlivé posuny bodu T se od těch nivelovaných liší násobně. Můžeme sice vidět jistou paralelu v období noci, kdy jsou obě křivky klidnější a ekvidistantní, nicméně rozdíl mezi nimi se pohybuje okolo 6 mm, což je cca 70 % celkové chyby. Metoda DRPV sice v jistém smyslu odhalila, kdy je atmosféra stabilnější, ale velikost vlivu refrakce je prakticky zcela jiná. Během denní doby jsou pak rozdíly více nahodilé a křivka DRPV vykazuje výrazné extrémy, které se ve skutečné refrakci buď neprojeví, nebo jen mírně. Korelační koeficient obou křivek je pak 0,51, což je vyšší hodnota než u výpočtu jednoduchými vzorci, nicméně stále příliš nízká na to, aby bylo možné uvažovat o jejím využití.

Naopak srovnání jednotlivých výpočetních metod (viz Obr. 83) nám ukazuje jasnou provázanost výpočtů a lze to vnímat i jako kontrolu výpočetního programu. Výpočty pomocí jednoduchých vzorců jsou numericky téměř stejné, zatímco metoda DRPV vykazuje téměř systematickou odchylku v hodnotě 1,5 až 2 mm, způsobenou přesnějším iterativním výpočtem lépe zohledňujícím teplotní pole, kterým prochází paprsek. Korelace DRPV a obou uvedených metod výpočtu je 0,97.



Obr. 83 Porovnání jednotlivých metod výpočtu

8.6.5 Závěry experimentu

Tento experiment byl navržen tak, aby bylo možné bezpečně určit vliv refrakce (zdánlivého vertikálního posunu) na pozorovaný bod T za pomoci porovnání převýšení určeného nivelací (bez vlivu refrakce) a etapovým měřením totální stanicí (s proměnným vlivem refrakce). Následným porovnáním vypočtených zdánlivých posunů ze znalosti fyzikálních parametrů atmosféry (teploty, teplotního gradientu) mělo být rozhodnuto o aplikovatelnosti navržené metody uvažující měření teplotního gradientu na začátku a konci měřené trajektorie a výpočetní metody DRPV.

Výsledky bohužel prokazatelně dokazují, že není možné podchytit vliv refrakce pomocí takto jednoduchého modelu (definovaného dvěma měřicími sadami). Teplota (gradienty) se zřejmě i v takto homogenním prostředí nechová systematicky, a tak není možné získat věrohodné výsledky popisující aktuální vliv refrakce.

Všechny výpočetní metody poskytovaly velmi podobné výsledky, nicméně tyto výsledky jsou velmi vzdálené skutečnosti a není možné je uvažovat za směrodatné. Důvodem zřejmě je neurčitelnost proměn atmosféry v rámci její trajektorie, ať už je vinou složité prostorové uspořádání (náhodný horizontální teplotní gradient), drobné či časově krátké a teplotními čidly neměřitelné změny teplot, nebo například jeden konkrétní vliv (teplotní tunel v prostoru trajektorie, který nebyl měřen na soupravách).

Výsledkem experimentu bohužel je, že za daných okolností a s danými pomůckami není možné určovat vliv refrakce nebo alespoň odhadnout vhodnou dobu pro měření. Jediné, co lze prakticky vyčíst z metod, je zklidnění (systematizace) refrakce v nočních hodinách experimentu.

Otázkou zůstává, zda by bylo možné zlepšit výsledky experimentu, pokud by se zvětšil počet měřících aparatur pro určování teplotního gradientu nebo pokud



by se zmenšila měřená vzdálenost (a tím zajistila vyšší pravděpodobnost homogenního vlivu refrakce). Tyto otázky budou konfrontovány v následujících experimentech.

8.7 Měření ověřující homogenitu teplotního gradientu – měření 4 soupravami

Vzhledem k výsledkům předchozího experimentu, které prokázaly, že není prakticky možné podchytit chování přízemní úrovně atmosféry pomocí dvou měřících souprav umístěných na koncích trajektorie (přestože celá trajektorie probíhala nad prakticky homogenním asfaltovým povrchem v téměř stejné výšce a za velmi obdobného osvětlení sluncem), byl připraven doplňující experiment zabývající se opět otázkou horizontální stability vertikálního teplotního gradientu.

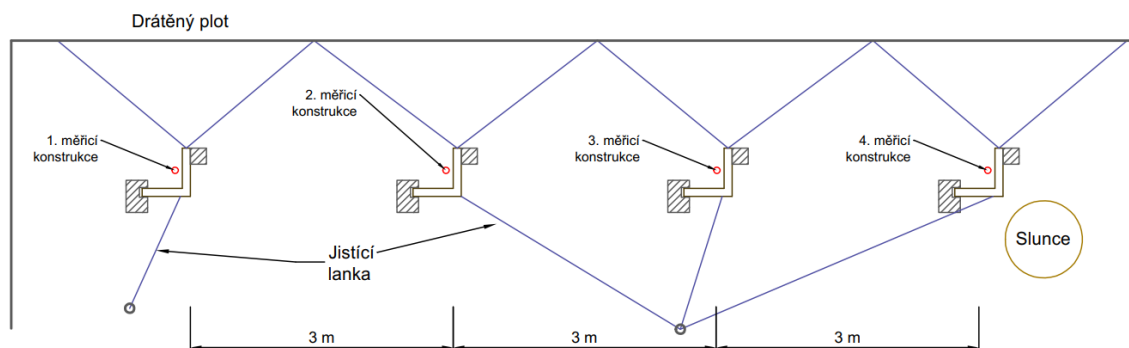
Aby bylo možné lépe odhadnout jeho vývoj, byly pro potřeby tohoto a následujícího měření dokoupeny dvě další sady čidel a loggerů (ve variantě 6.3.3) a byly vyrobeny další a upraveny stávající stínící a nosné konstrukce. Díky tomu bylo možné pozorovat teplotní gradient na 4 pozicích oproti předchozím dvěma. Úpravou konstrukcí bylo přidání další stínící vrstvy z polystyrenu (která byla u vybraných měření již použita) a její nabarvení na stříbrnou barvu pro dosažení ještě lepších tepelně izolačních vlastností.

Těmito čtyřmi soupravami byl sledován vývoj teploty a teplotního gradientu nad asfaltem v rozsahu jednoho dne. Soupravy byly tentokrát umístěny velmi blízko u sebe v řadě (v rozestupu cca 3 m), aby bylo možné posoudit, zda dochází k vývoji teploty v horizontálním směru, nebo zda je horizontální gradient spíše náhodný.

8.7.1 Nastavení experimentu

Aby bylo možné vhodně vyhodnotit tento experiment, tak byl proveden dvakrát na stejné místě na asfaltovém povrchu v zadní hlídané části areálu FSv ČVUT. První celodenní měření probíhalo 11. 6. 2023 za slunného počasí, druhé pak bylo úmyslně zvoleno dne 21. 7. 2023 při oblačném počasí.

Všechny 4 soupravy byly umístěny dle schématu Obr. 84 do řady do prostoru nad souvislým homogenním asfaltovým povrchem a byly ukotveny k drátěnému plotu (ve vzdálenosti cca 3 metrů). Rozestupy mezi soupravami byly přibližně 3 m. Měření probíhalo s intervalem odečtu po 10 sekundách po dobu více než jednoho dne. Následně z tohoto souboru byl vybrán souvislý soubor 24 hodin.

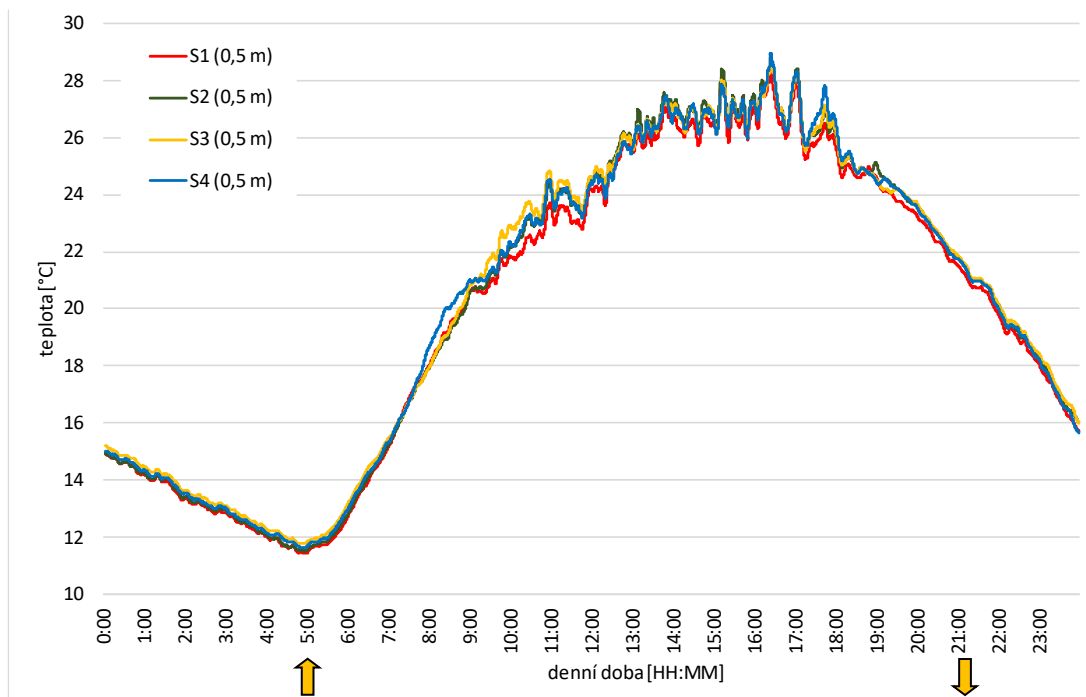


Obr. 84 Rozmístění přístrojů a pomůcek



8.7.2 Výsledky měření 11. 6. 2023

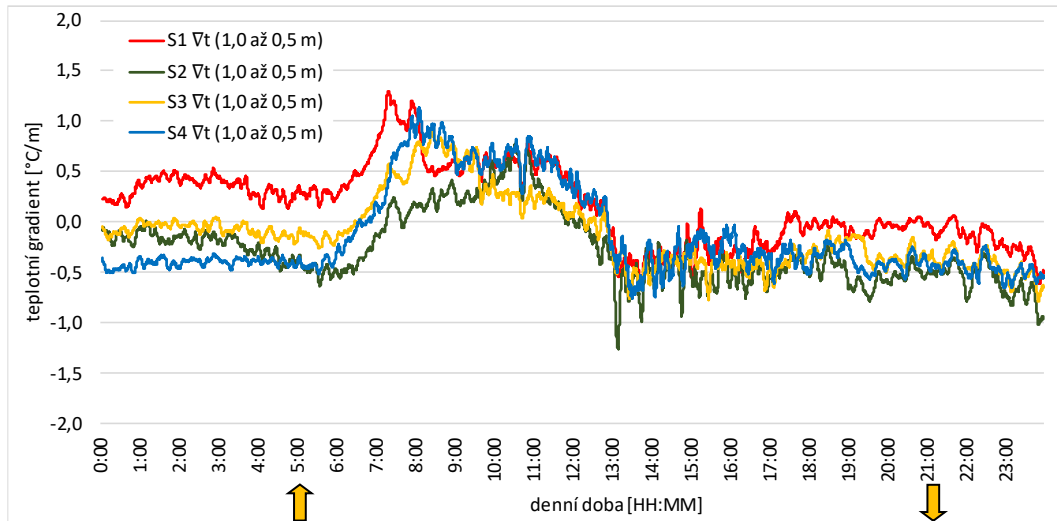
Jelikož je naměřený soubor dat tvořen měřením ze 4 souprav, tak je prakticky nemožné jej přehledně zobrazit v rámci jednoho grafu. Proto zde budou prezentována jen vybraná data. Na Obr. 85 jsou zobrazeny teploty v nejnižší úrovni (ve výšce 0,5 m nad terénem) upravené klouzavým průměrem s velikostí okna 40 měření.



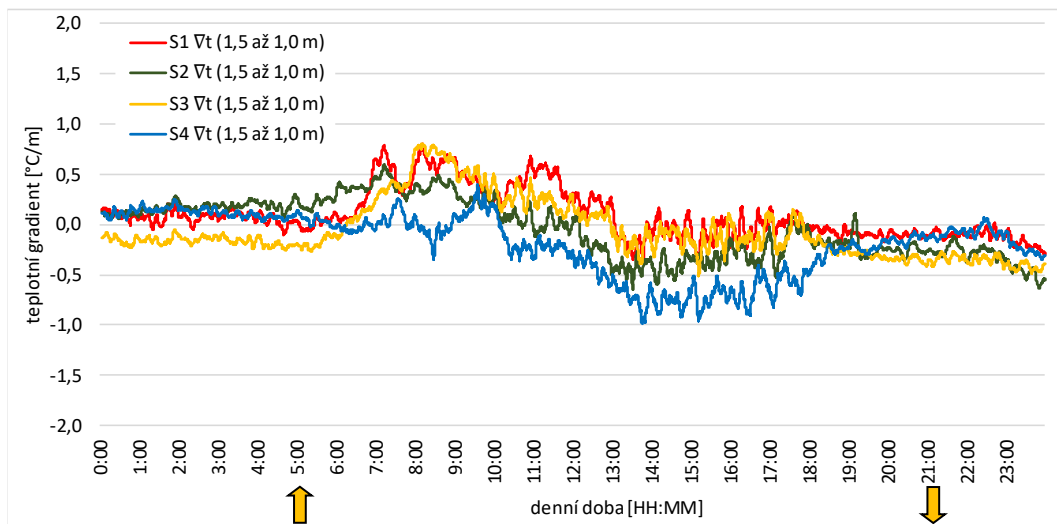
Obr. 85 Měření 11. 6. 2023 – teploty 0,5 m

Křivky jsou si na první pohled podobné, v nočních hodinách jsou měřené teploty na všech konstrukcích prakticky stejné, zatímco přes den dochází k odlišnostem v jejich trendu. Takovýto rozkol vidíme okolo 8. až 12. hodiny, kde nastal rozdíl mezi měřenou teplotou S1 a S3 více než 1 °C. Nicméně korelační koeficient teplot (v zadané úrovni) mezi sebou dosahoval vždy hodnoty více než 0,99. Tohle číslo prakticky definuje již dříve popisovaný denní teplotní trend.

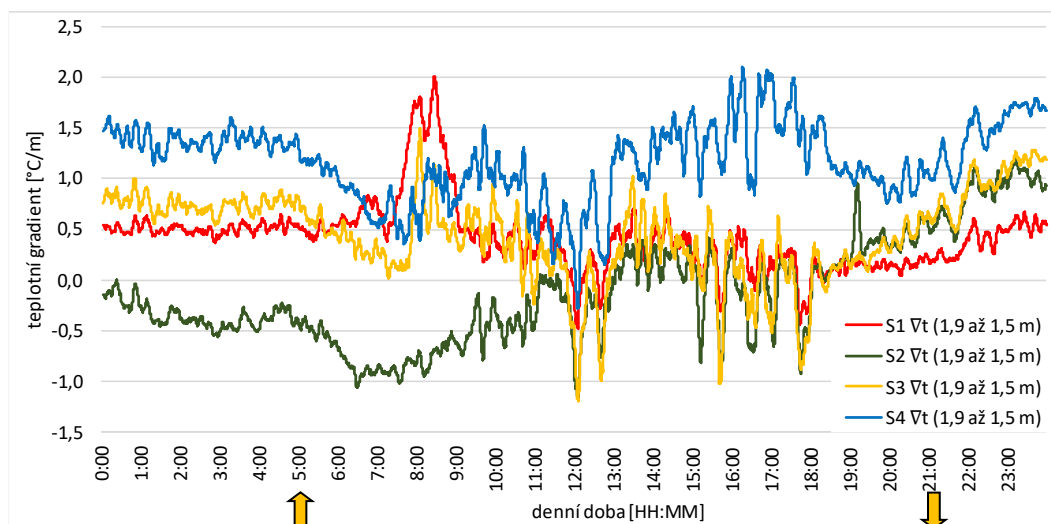
Pro naše bádání je zajímavější porovnání teplotních gradientů vyobrazených na Obr. 86, Obr. 87 a Obr. 88.



Obr. 86 Měření 11. 6. 2023 – teplotní gradienty 0,5 až 1,0 m



Obr. 87 Měření 11. 6. 2023 – teplotní gradienty 1,0 až 1,5 m



Obr. 88 Měření 11. 6. 2023 – teplotní gradienty 1,5 až 1,9 m

V nejnižší úrovni opět pozorujeme nárůst gradientu od východu slunce do cca 8:00 (hodnoty 1 °C/m), následuje ustálení gradientu a od přibližně 11 hodin vidíme pokles do záporných čísel, což způsobuje rozpálení asfaltu. Vidíme také jisté vazby mezi křivkami, a to zejména v nočních hodinách, kdy by bylo téměř možné mluvit o horizontálním gradientu.

Ve druhém výškovém úseku nabývá gradient výrazně menších hodnot, což bylo již mnohokrát pozorováno a je to dáno vyrovnáním vlivu podkladu a teplotní stratifikace. Křivky jsou si vzájemně bližší.

I v nejvyšší úrovni můžeme na křivkách vidět jisté podobnosti, nicméně je zřejmé, že není možné ani v takto malém rozsahu považovat teplotní gradient v této úrovni za konstantní. Jistý horizontální vývoj bychom mohli pozorovat v době mezi 20. až 24. hodinou.

Náhled na všechny tyto informace nám poskytne korelační koeficient určený vždy pro sousední dvojici souprav a pak pro zajímavost také mezi první a poslední soupravou (zobrazený v Tab. 28).

Tab. 28 Korelační koeficienty určené mezi sousedními soupravami 11. 6. 2023

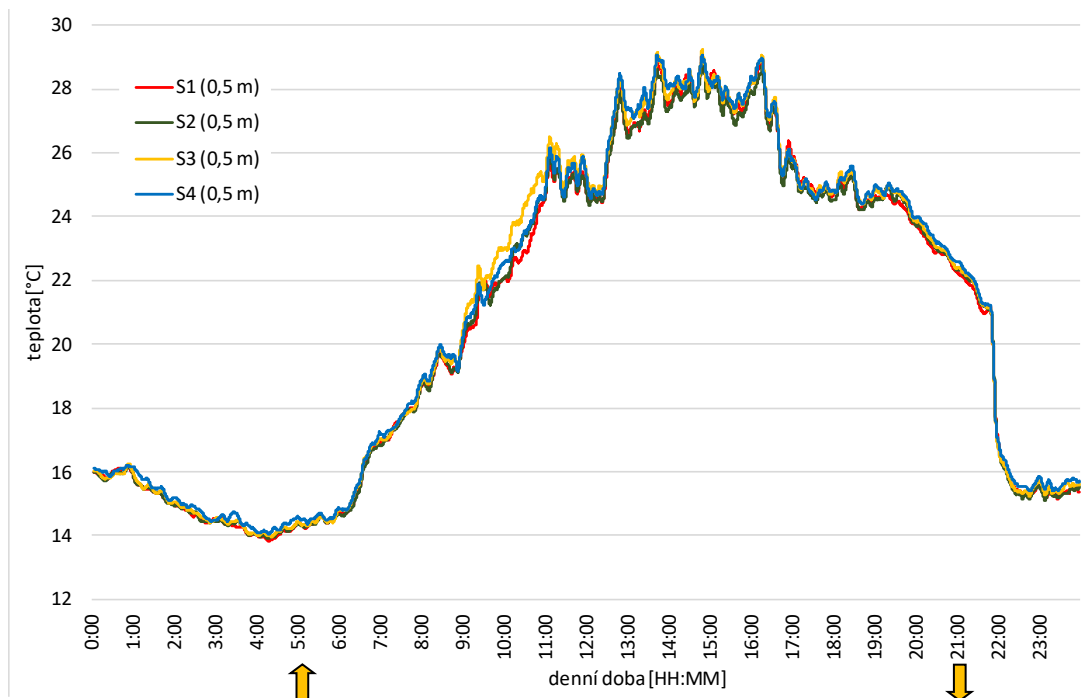
Úsek	S1 – S2	S2 – S3	S3 – S4	S1 – S4
1,5 až 1,9 m	-0,16	0,39	0,31	-0,02
1,0 až 1,5 m	0,54	0,51	0,15	0,26
0,5 až 1,0 m	0,68	0,73	0,74	0,61

Opět vidíme výraznou náhodnost v nejvyšší úrovni atmosféry, kdy korelace je téměř nulová. Ve druhé výškové úrovni již vidíme mírnou korelaci mezi první a druhou i mezi druhou a třetí konstrukcí, nicméně třetí a čtvrtá má znatelně nižší hodnotu. V nejnižší úrovni pozorujeme opětovný nárůst na hodnotu korelačního koeficientu okolo 0,7, která je poměrně stabilní a téměř ji vykazuje i vztah mezi první a poslední konstrukcí.



8.7.3 Výsledky měření 21. 7. 2023

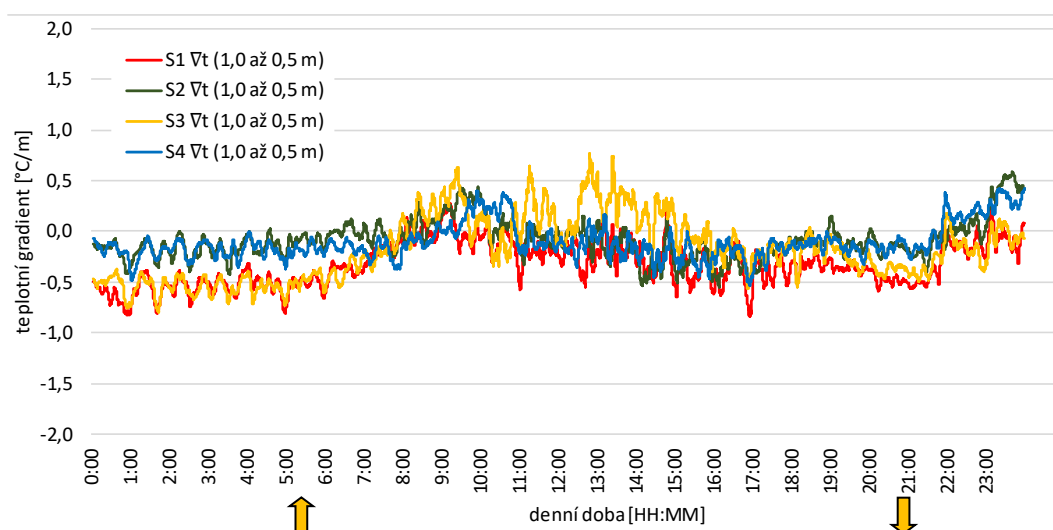
Pro porovnání zde budou stejnou formou prezentována i data z měření 21. 7. 2023, kdy bylo oblačno. Obr. 89 zobrazuje teploty změřené v nejnižší úrovni.



Obr. 89 Měření 21. 7. 2023 – teploty 0,5 m

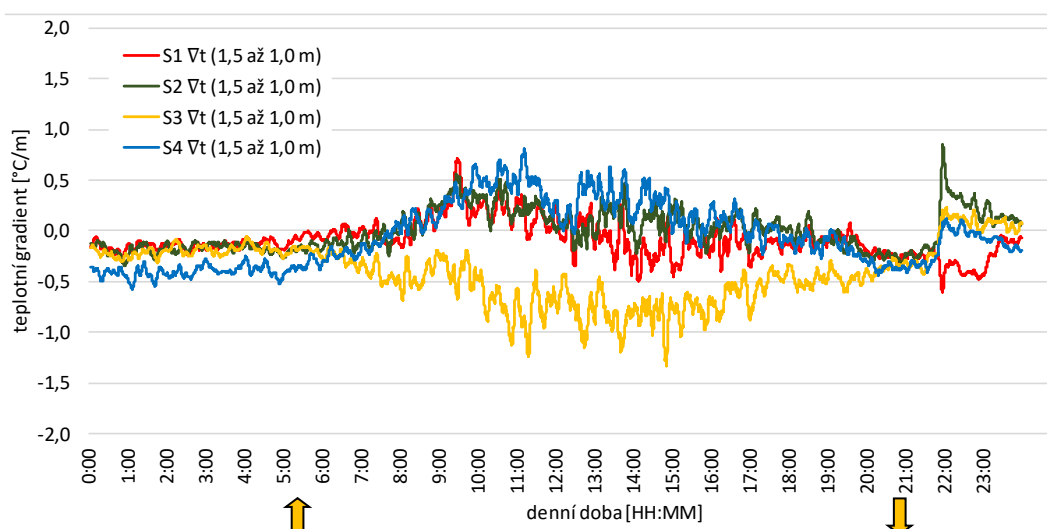
Oproti předchozímu měření vidíme méně nápadný denní trend, kdy jsou zde patrné teplotní propady způsobené přechody větších mraků. Nicméně vidíme i výraznější rozdíly mezi jednotlivými teplotami. Korelační koeficient je opět u všech teplot přes 0,99.

Teplotní gradienty pro jednotlivé výšky jsou zobrazeny v Obr. 90, Obr. 91 a Obr. 92.

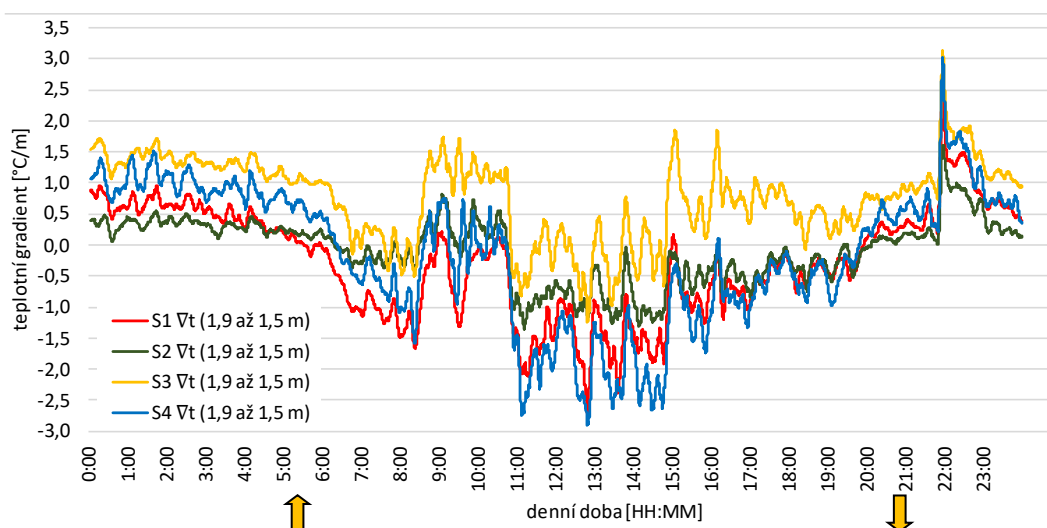




Obr. 90 Měření 21. 7. 2023 – teplotní gradienty 0,5 až 1,0 m



Obr. 91 Měření 21. 7. 2023 – teplotní gradienty 1,0 až 1,5 m



Obr. 92 Měření 21. 7. 2023 – teplotní gradienty 1,5 až 1,9 m

V nejnižší úrovni tentokrát vidíme jen malé a poměrně náhodné gradienty, což je způsobeno výrazně menším vlivem podkladu, než jaký byl v případě slunného dne, kdy docházelo k zahřívání asfaltu.

Ve střední vrstvě pak máme opět malý gradient a gradienty jsou si vzájemně podobné s výjimkou soupravy S3, která poměrně razantně vybočuje a její měření vykazuje prakticky opačný gradient. Důvod této anomálie není známý.

V nejvyšší úrovni dosahují gradienty násobně vyšší velikosti a dosahují i hodnot od -3 °C/m do 3 °C/m (což jsou dokonce vyšší hodnoty, než za slunného dne). Můžeme zde nejlépe pozorovat vliv přecházejících mraků, který se projevuje skokovým poklesem velikosti gradientu. V tomto případě není patrná výraznější závislost



gradientu na posloupnosti konstrukcí (není patrný systematický horizontální gradient). Naopak vidíme očividnou podobnost trendu křivek.

Korelační koeficienty mezi blízkými soupravami jsou uvedeny v Tab. 29.

Tab. 29 Korelační koeficienty určené mezi sousedními soupravami 21. 7. 2023

Úsek	S1 – S2	S2 – S3	S3 – S4	S1 – S4
1,5 až 1,9 m	0,84	0,77	0,82	0,91
1,0 až 1,5 m	0,19	-0,07	-0,41	0,31
0,5 až 1,0 m	0,39	0,30	0,24	0,33

Při měření v oblačném dni vidíme na korelačních koeficientech, že korelace v nejnižší úrovni je výrazně nižší než při slunném dni. V tomto případě bychom ji měli považovat spíše za náhodnou s malou mírou závislosti. Ve střední pozici pak vidíme nejméně provázané gradienty, kdy není patrný ani žádný vývoj závislosti. V úrovni od 1,5 do 1,9 opět vidíme nejvýraznější korelaci dosahující hodnot okolo 0,8, přičemž je takto vysoká i v případě porovnání první a poslední soupravy.

8.7.4 Závěry experimentu

Experiment měl prozkoumat, zda je možné považovat vertikální gradient za stabilní v rámci menšího území anebo zda lze v takové oblasti očekávat nějaký vliv horizontálního gradientu (respektive vývoj vertikálního gradientu v prostoru).

Výsledky prokázaly, že uvažování takové myšlenky je chybným předpokladem, jelikož se gradienty prokazatelně a prakticky náhodně mění i v rámci malého prostoru (jednotek metrů). Jisté podobnosti byly sice prokázány v nejnižší úrovni atmosféry za slunného dne a v nejvyšší za oblačného dne, ale ani tyto korelace nám nepřinášejí praktickou možnost odvozovat s dostatečnou přesností chování gradientu mezi dvojicí čidel v horizontálním směru.

Toto zjištění vrhá jasnější světlo na důvod nedosažení kvalitních výsledků předchozím experimentem, který ovšem z důvodu předpokladu podobnosti gradientů (nebo alespoň jejich vývoje ve směru) ani nemohl skončit vypočítáním správných zdánlivých posunů.

Popis atmosféry z hlediska teploty ve venkovním prostředí vyžaduje zřejmě výrazně vyšší počet čidel, než jaké byly dosavadní předpoklady jak této, tak dalších prací uvažujících měření a zavádění teplotního gradientu pro výpočet vlivu refrakce. Je dokonce pravděpodobné, že není možné prakticky s dostatečnou přesností určit teplotní pole na základě měření čidly v prostoru (použitím rozumně malého počtu čidel).

Výsledky tohoto a předchozího experimentu prokazují, že vliv refrakce je obecně významně složitější (a méně uchopitelný), než jak bylo v prvních experimentech uvažováno. Jakékoli určování teploty ve vnějším prostředí je natolik náhodné a nezávislé, že je nepravděpodobné, že by bylo možné pouze diskretním měřením teploty (gradientu a dalších parametrů atmosféry) určovat vliv refrakce na geodetická měření, a to navzdory tomu, že existují různé publikace a články, které tento přístup používají či navrhují.



Pro odstranění anebo potlačení refrakce bude pravděpodobně potřeba přidat vhodnější parametry a celkově upravit princip výpočtu. Za tímto účelem byl navržen princip diferenční metody, který je testován v posledním experimentu včetně porovnání s dosavadními postupy výpočtu uvažujících jen měření atmosférických parametrů.

8.8 Upravený experiment potlačení vlivu refrakce

Vzhledem k tomu, že předchozí experimenty (8.6 a 8.7) ukázaly na významně nedostatečnou schopnost podchycení refrakčních vlivů atmosféry za pomoci dvou soustav čidel umístěných na začátku a na konci dráhy, byl připraven další ověřující experiment. Ten byl na základě zjištění z předchozích měření upraven a rozšířen o princip diferenčního měření.

Cílem tohoto experimentu je zjištění, zda je prakticky možné diskrétně popsat stav v přízemní úrovni atmosféry pomocí měření teploty v rozumném počtu měřících aparatur rozmístěných podél dráhy. Případně zda je možné toto určit natolik přesně, aby bylo možné měření použít výpočtu opravy geodetických měření. Zároveň půjde o test nové myšlenky uvažující související vliv refrakce mezi blízkými body. Tato úvaha považuje vliv refrakce jako významně časově proměnný a nepředvídatelný za pomoci fyzikálních čidel, nicméně v rozsahu měřené dráhy a směru za systematický v krátkém čase. Tuto úvahu potvrzuje i zavedený princip měření zenitových úhlů ve dvou polohách ihned po sobě (čímž se minimalizuje vliv časové proměny refrakce).

8.8.1 Nastavení experimentu

Experiment těží z poznatků získaných v experimentu popsaném v kapitole 8.6. Prakticky jde o jeho úpravu zahrnující zvýšení počtu měřících aparatur na 4 soupravy čidel, snížení vzdálenosti pro potlačení vlivů souvisejících s horizontálním vlivem změn atmosféry, zvýšení počtu měření (snížení doby jedné etapy měření), přidání druhého „referenčního“ měřeného cíle a také omezení kontrolování stability cílů a TS, které se v minulém experimentu jevíly co do výšky velmi stabilně.

Samotné měření probíhalo od 14. 8. 2023 16:00 do 15. 8. 2021 17:00 (SEČ). Volba termínu byla provedena velmi pečlivě s ohledem na nutnost prokazatelnosti experimentu (období, kdy je měřitelný a velký vliv refrakce). Problémem bylo snížení vzdálenosti mezi stanoviskem a cílem (což bylo provedeno z praktických důvodů), které snížilo vliv refrakce oproti předchozímu experimentu. Proto byl vybrán termín, kdy se dle předpovědi očekávala tropická vedra s teplotou více než 30 °C a bezoblačné počasí. Tento předpoklad se naštěstí potvrdil a po celou dobu měření bylo zcela jasno a téměř bezvětří.

Pro realizaci experimentu byl opět zvolen prostor před budovou Fakulty stavební ČVUT – park I. Gándhiové. Samotná dráha paprsku byla vedena v plném rozsahu nad homogenním asfaltem a oproti minulému experimentu probíhala mimo oblasti zastíněné stromy či keři.

Zajištění stability stativů bylo také pozměněno oproti původnímu experimentu. Stabilita pozice TS byla sledována měřením na dva blízké cíle (stabilizované obdobně jako u předchozího experimentu) a stabilita cílů (s ohledem na jejich výškovou stabilitu prokázanou v předchozím experimentu a významně nižší hmotnost cílového znaku) ověřována nebyla. Tyto změny byly provedeny především z důvodu šetření energie



baterií TS, se kterými byl v předchozím případě problém, a z protichůdné potřeby zvýšení celkového počtu etap. Rozložení pomůcek je zobrazeno na Obr. 93.



Obr. 93 Rozmístění přístrojů a pomůcek

Z obrázku je zřejmé že totální stanice (TS1 – Trimble S9 HP) postavena na stativu ve výšce cca 1,7 m v rámci každé etapy měřila 4 směry. Měřeno bylo na dva kontrolní body CP1 a CP2 a dva pozorované body T1 (cca 75 m) a T2 (cca 108 m). Dále bylo v jedné z etap měřeno také na blízký bod N1, mezi nímž a bodem N2 byl následně měřen nivelační pořad sloužící k určení skutečného převýšení.

Body CP1 a CP2 sloužily ke kontrole stability TS a určování její výšky v rámci jednotlivých etap. Byly umístěny v těsné blízkosti TS v trávníku na zatlučených kolících s redukcí umožňující osazení mini hranoly. Body T1 a T2 byly umístěny vůči sobě ve vzdálenosti cca 30 metrů a z důvodu požadavků automatického cílení na opačných stranách asfaltové cesty (minimální úhlový rozestup mezi automaticky docilovanými body). Jednalo se o stativy opět osazené mini hranoly ve výšce cca 1,7 m nad terénem. V pravidelném rozestupu po cca 25 metrech byly dále umístěny 4 nosné konstrukce osazené čtyřmi zalitými teplotními čidly (viz 6.1.1.2).

Pro určení převýšení mezi T1, T2 a bodem N2 bylo provedeno jednorázové měření totální stanicí.

Vzhledem k tomu, že body N1, N2, CP1 a CP2 jsou umístěné blízko totální stanice, ze které bylo měřeno, je zde vliv refrakce prakticky nulový. Mezi body N1 a N2 bylo následně v jiném termínu provedeno měření nivelačním přístrojem Trimble DiNi, a tím bylo určeno referenční správné převýšení mezi TS1 a T1/T2.

Měření totálních stanic probíhalo ve dvou polohách dalekohledu v intervalu etapy cca 5 minut (doba od konce poslední etapy 3 minuty), měření teplotních senzorů se uskutečnilo každých 10 s.

Interní hodiny všech přístrojů byly synchronizovány na středoevropský čas (SEČ) a pro následný výpočet bylo nutné interpolovat jednotlivé měřené údaje v čase vůči přesnému okamžiku měření TS1.

Pro potřeby výpočtů byla navržena lokální souřadnicová síť definovaná rovnoběžkou s osou X procházející spojnicí TS1 a T1 (optickým středem hranoly a TS). Měřítkový faktor byl nastaven na 1. Souřadnice v nulté etapě bodů TS1, T1 a T2 jsou uvedeny v Tab. 30.



Tab. 30 Souřadnice TS1, T1 a T2 v 0. etapě

Číslo bodu	Y [m]	X [m]	Z [m]
TS1	5000,000	1000,000	100,000
T1	5000,000	1074,942	103,669
T2	4995,282	1107,590	104,599

V průběhu experimentu bylo plánováno i měření rychlosti a směru větru, bohužel však došlo k chybě při ukládání dat na SD kartu. Díky této chybě byla získána jen průměrná hodinová data oproti plánovaným záznamům jedenkrát za 10 sekund. Nicméně jak již bylo zmíněno výše, během dne bylo po celou dobu téměř bezvětří.

8.8.2 Měření

Jak již bylo popsáno dříve, měření probíhalo v srpnu roku 2023 v rozsahu cca 25 hodin s intervalem etap měření TS cca 5 minut. Dále bylo měřeno 4 sadami teplotních čidel, umístěných na stínící a nosné konstrukci, rozmístěných v pravidelných rozestupech ve směru měření.

Měřeno bylo tedy za pomoci totální stanice (TS1) převýšení na určované body (T1 a T2), které je prakticky ovlivněno atmosférickou refrakcí, a to na každý z cílů v jiné míře. Na základě zkušenosti z předchozích měření i výpočtů je možné předpokládat, že se refrakce bude projevovat s vyšší mírou na vzdálenější bod a nižší mírou na bod bližší. To následně lze využít pro diferenční způsob řešení vlivu refrakce.

Dále je z teplotních gradientů určovaných čidly možné dle DRPV určit dráhu průchodu paprsku atmosférou, a tak i očekávaný zdánlivý vertikální posun cílů T1 a T2.

Jako správná (bez vlivu refrakce) lze pak považovat převýšení určená nivelací mezi body N1 a N2 s doměřením převýšení na krátkých záměrech na body T1, T2 a TS. Pro komparovatelnost převýšení určeného z TS a z nivelace je potřeba odstranit chybu ze zakřivení Země, kterou metoda nivelace ze středu principiálně opravuje (oprava na kouli na danou nivelovanou vzdálenost je rovna 0,53 mm).

Z naměřených surových dat byla následně pro každou etapu spočítána výška přístroje TS1 (z měření na body CP). Změna výšky přístroje za celou dobu experimentu nepřesáhla hodnotu 0,35 mm.

Měření všech přístrojů bylo třeba časově synchronizovat na čas měření TS1, toho bylo docíleno prostou lineární interpolací, která je popsána již v experimentu 8.6.

8.8.3 Výsledky měření

V této kapitole budou prezentovány výsledky měření, jejich přesnosti a vzájemné vztahy.

8.8.3.1 Určení převýšení nivelačním přístrojem

Nivelačním přístrojem bylo změřeno převýšení mezi body N1 a N2. Toto převýšení bylo použito k výpočtu přesného převýšení mezi TS1 a T1 a T2 (bez vlivu refrakce). Pro kontrolu a přesnější určení převýšení bylo měření třikrát nezávisle opakováno. Při měření byly použity celistvé dvoumetrové nivelační latě s digitálním kódem a přístroj byl nastaven na dvojité odečet a kontrolu mezního pohybu latě.



Výsledné průměrné převýšení $h_{N1,N2} = 2,2690$ m se směrodatnou odchylkou 0,21 mm. Z něj vypočítané výšky bodů T1 a T2 jsou uvedené v Tab. 31.

Tab. 31 Výšky T1 a T2 v 0. etapě

Číslo bodu	Z [m]
T1	103,6679
T2	104,6004

8.8.3.2 Výsledky měření teplot

Celkem bylo během experimentu změřeno 8 842 etap teploty pro každou ze čtyř měřících souprav umístěných na nosné konstrukci. Na každé konstrukci byla umístěna 4 teplotní čidla ve výškách 0,5 m, 1,0 m, 1,5 m a 1,9 m nad terénem s intervalem záznamu 10 s. Tyto surové teploty byly pomocí klouzavého průměru s intervalem okna 3 (3 měření během 30 s) přepočítány z důvodu potlačení případného vlivu hrubých chyb. Výpočet byl opakován s různě velkým oknem a také úplně bez průměrování s prakticky stejnými výsledky.

Zajímavou otázkou vyvstávající z předchozích pokusů je podobnost – korelace naměřených dat určovaných ve stejnou dobu nad stejným povrchem v relativně malém prostoru (desítky metrů). Korelace naměřených teplot v jednotlivých výškových úrovních vždy dosahovala hodnoty přes 0,99, což ovšem není pro samotné určování refrakce příliš významné, jelikož se do korelace projevuje celý denní trend vývoje teploty, jak již bylo vysvětleno. Zajímavějším údajem je korelace teplotních gradientů, která je uvedena v Tab. 32.

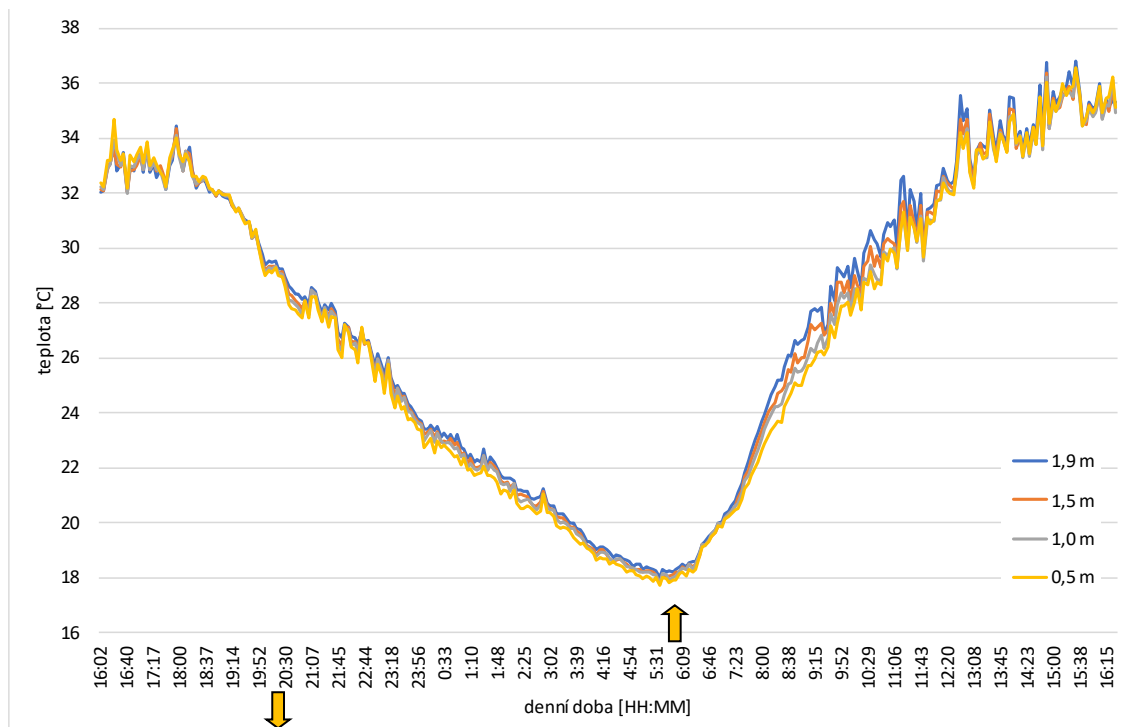
Tab. 32 Korelace teplotních gradientů

Výškový úsek	Měřicí souprava	S1	S2	S3	S4
1,5 až 1,9 m	S1	1	0,3048	0,6063	0,1354
	S2	0,3048	1	0,2329	0,1714
	S3	0,6063	0,2329	1	0,3911
	S4	0,1354	0,1714	0,3911	1
1,0 až 1,5 m	S1	1	-0,1746	0,5989	0,1802
	S2	-0,1746	1	-0,3183	0,1323
	S3	0,5989	-0,3183	1	0,0003
	S4	0,1802	0,1323	0,0003	1
0,5 až 1,0 m	S1	1	0,2257	0,5801	0,2242
	S2	0,2257	1	0,5844	0,5886
	S3	0,5801	0,5844	1	0,4648
	S4	0,2242	0,5886	0,4648	1



Zde je vidět, že korelace je nízká, což znamená, že ani v těchto velmi homogenních podmínkách se atmosféra nechová stabilně a spojitě.

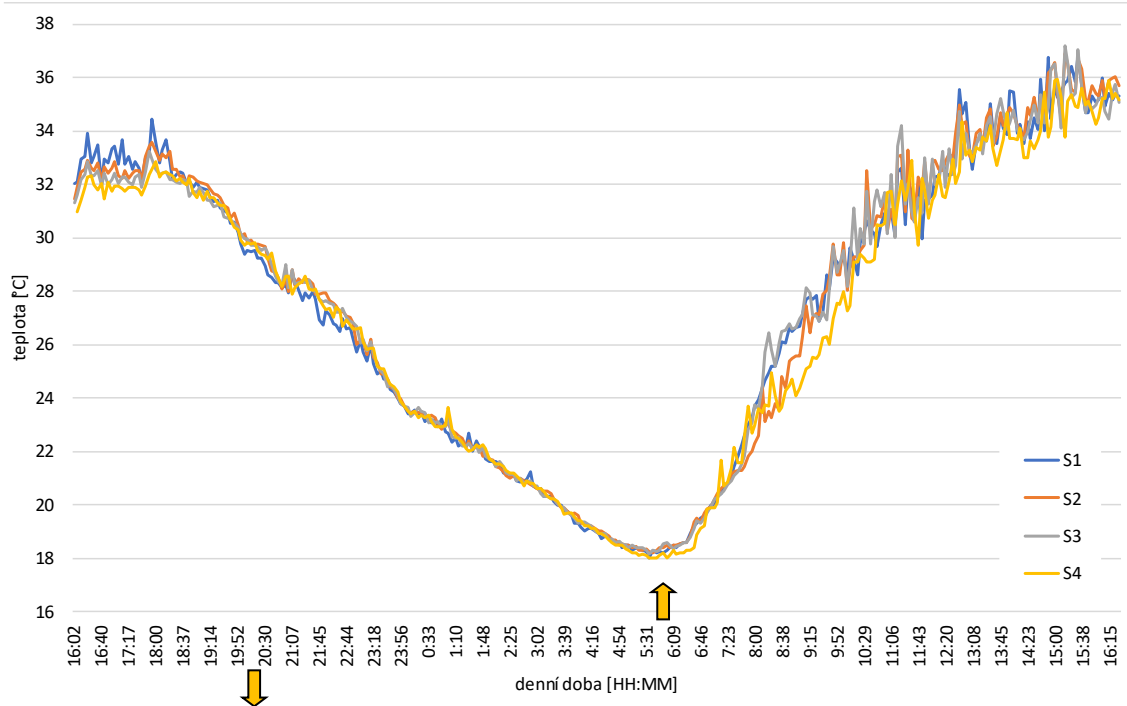
Dalším krokem bylo přepočítání teplot na čas měření totální stanice. Tato data byla získána prostou lineární interpolací. Tímto způsobem vzniklo 308 etap odpovídající času měření totální stanice. Pro představu o teplotních poměrech jsou zobrazena data z první měřicí soupravy na Obr. 94.



Obr. 94 Měření teploty na soupravě S1

Na obrázku je vidět, že byl vybrán den s tropickými teplotami dosahujícími v denním maximu více než 36 °C. Naopak v noci teploty klesly až k 18 °C. Patrné je také teplotní rozvrstvení v nočních hodinách (cca od 24:00 do 6:00) a pak ještě výraznější v dopoledních hodinách (cca od 8:00 do 12:00). Naopak v denních maximech se teploty téměř srovnaly.

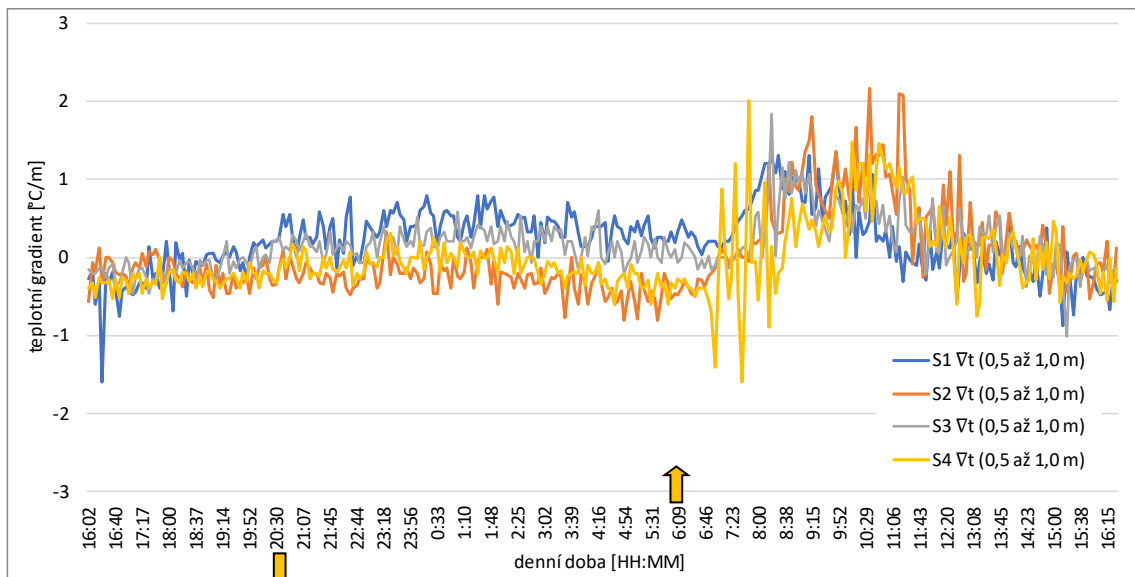
Na Obr. 95 jsou zobrazeny teploty určené na všech soupravách pro nejvyšší profil.



Obr. 95 Měřené teploty ve výšce 1,9 m

Oproti předchozímu grafu tvořenému daty z jedné soupravy jsou teploty v tomto grafu více rozdílné, což potvrzuje i dříve uvedený korelační koeficient.

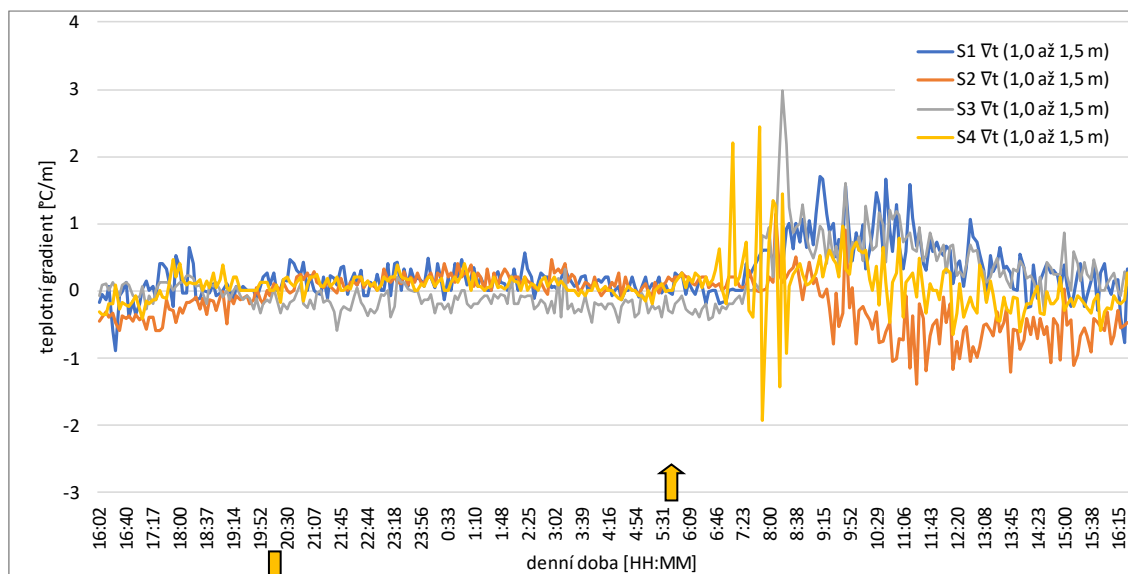
Opět je pro náš výzkum zajímavější problematika teplotních gradientů, které jsou ukázány pro každý z výškových úseků na Obr. 96, Obr. 97 a Obr. 98.



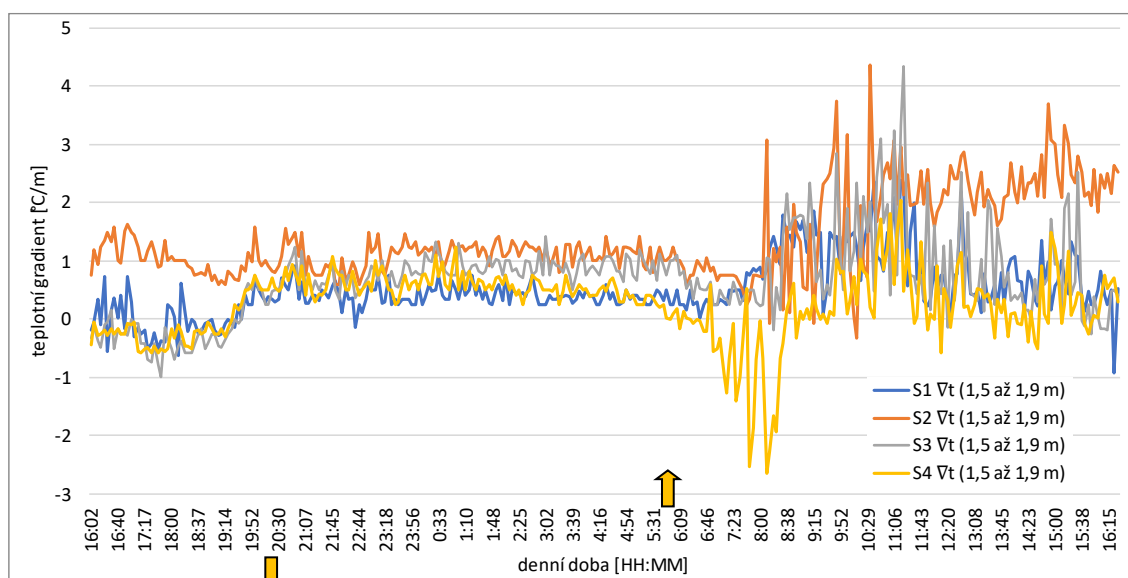
Obr. 96 Určené gradienty ve výškovém úseku 0,5 m až 1,0 m



ČVUT v Praze – Fakulta stavební
Disertační práce – Měřické experimenty



Obr. 97 Určené gradienty ve výškovém úseku 1,0 m až 1,5 m



Obr. 98 Určené gradienty ve výškovém úseku 1,5 m až 1,9 m

Z grafů gradientů lze vyčíst mnoho zajímavého, zejména je zde vidět významné rozdíly v chování gradientů v různých výškových úrovních. V nejnižší úrovni (0,5 až 1,0 m nad terénem) jsou gradienty nejvíce korelované, což můžeme přičíst relativně homogennímu vlivu sálání tepla z asfaltového povrchu. Střední pásmo (1,0 až 1,5 m nad terénem) je nejméně aktivní a gradienty dosahují nejmenších hodnot (což již bylo pozorováno u předchozích experimentů), zde se patrně vyrovnává vliv sálání podkladu a vliv vyšších teplot ve vyšších pozicích. Nejvýznamnější a zároveň nejméně homogenní se jeví nejvyšší měřená úroveň (1,5 až 1,9 m nad terénem), kde dosahují gradienty až hodnoty přes 4 °C/m.



Teploty a gradienty vypočítané pro dané etapy byly následně použity pro výpočet posunů pomocí fyzikálních vztahů, metody DRPV a neuronových sítí.

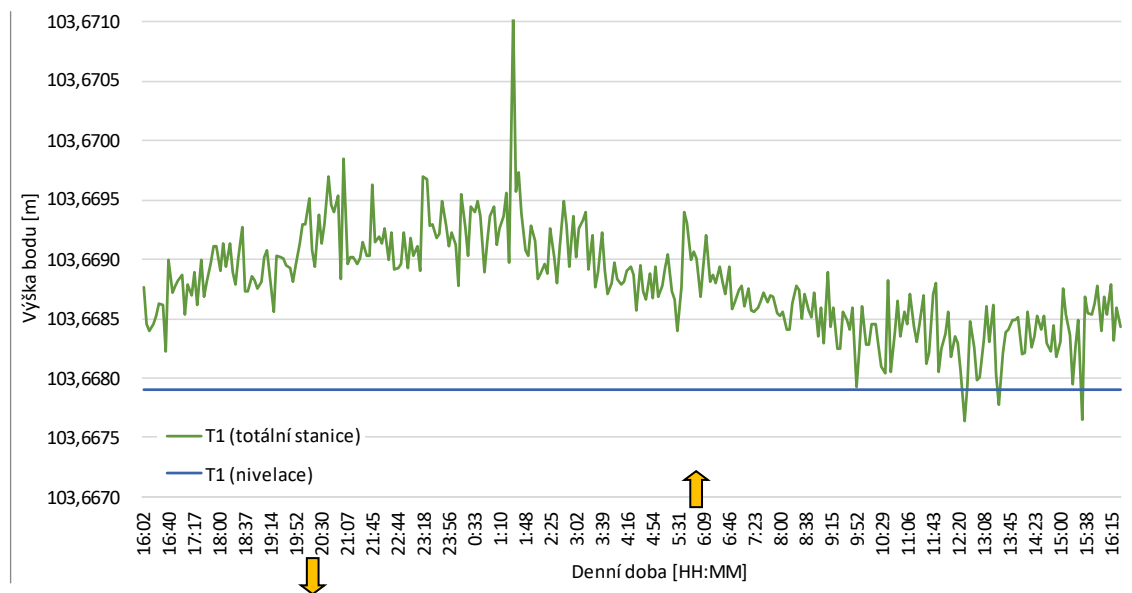
8.8.3.3 Výsledky měření totální stanice

V rámci každé etapy proběhlo měření na 4 cíle (dva kontrolní body CP1 a CP2) a dva určované body (T1 a T2). Měření probíhalo ve dvou polohách měřených ihned po sobě a interval mezi etapami byl nastaven na 3 minuty (včetně měření totální stanice zabrala etapa průměrně 5 minut). Tímto způsobem vzniklo 308 etap.

Z interního datového formátu (.job) totální stanice byl proveden export do upraveného formátu xml, který krom standardních měřených dat zobrazuje také časy měření, které byly potřeba pro harmonizaci času měřicích pomůcek.

Pro každou etapu byla zpětně určena výška přístroje z kontrolních bodů a s touto výškou následně probíhal výpočet výšek určovaných bodů. Vypočítaná výška stanoviska v rámci etapy určená výpočtem z CP1 a CP2 se lišila maximálně o 0,38 mm a její směrodatná odchylka napříč etapami byla 0,12 mm. Rozdíl určené výšky oproti nulté etapě byl pak maximálně 0,34 mm se směrodatnou odchylkou 0,11 mm. Tímto způsobem bylo prakticky ověřeno, že v průběhu experimentu nedocházelo k prokazatelnému výškovému pohybu totální stanice (což bylo na základě předchozího experimentu předpokládáno).

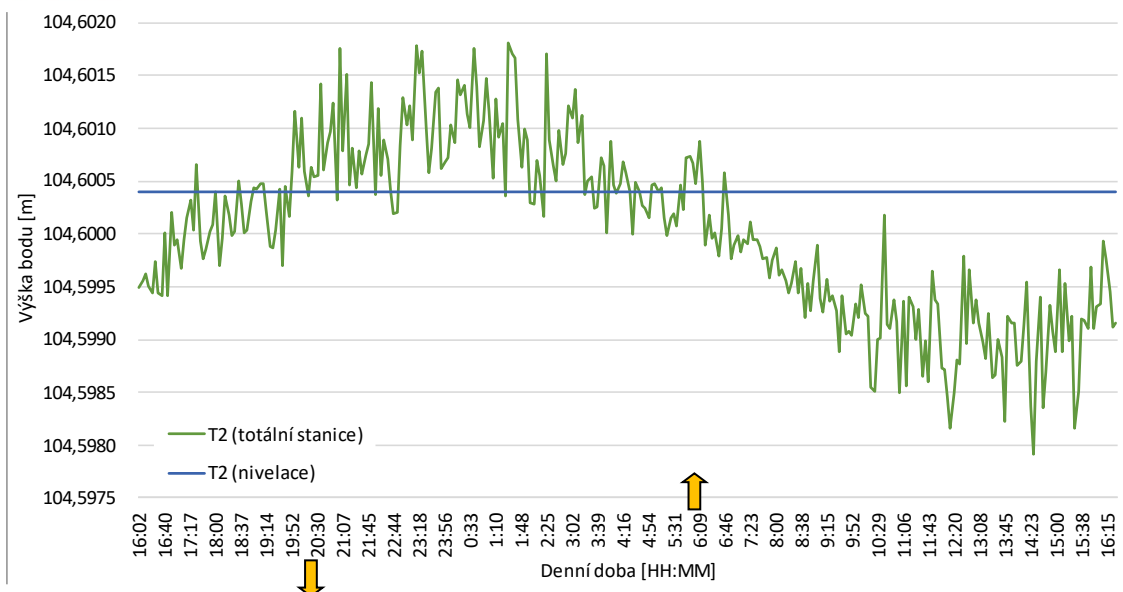
Z naměřených dat a vypočítané výšky stanoviska pro každou z etap byly spočítány výšky cílů T1 a T2, které jsou ovlivněny refrakcí. Z důvodu nutnosti porovnání byly výšky redukovány o vliv zakřivení Země. Tyto zdánlivé výšky a výšky správně vypočítané pomocí nivelace jsou uvedeny v grafech Obr. 99 a Obr. 100.



Obr. 99 Výška bodu T1

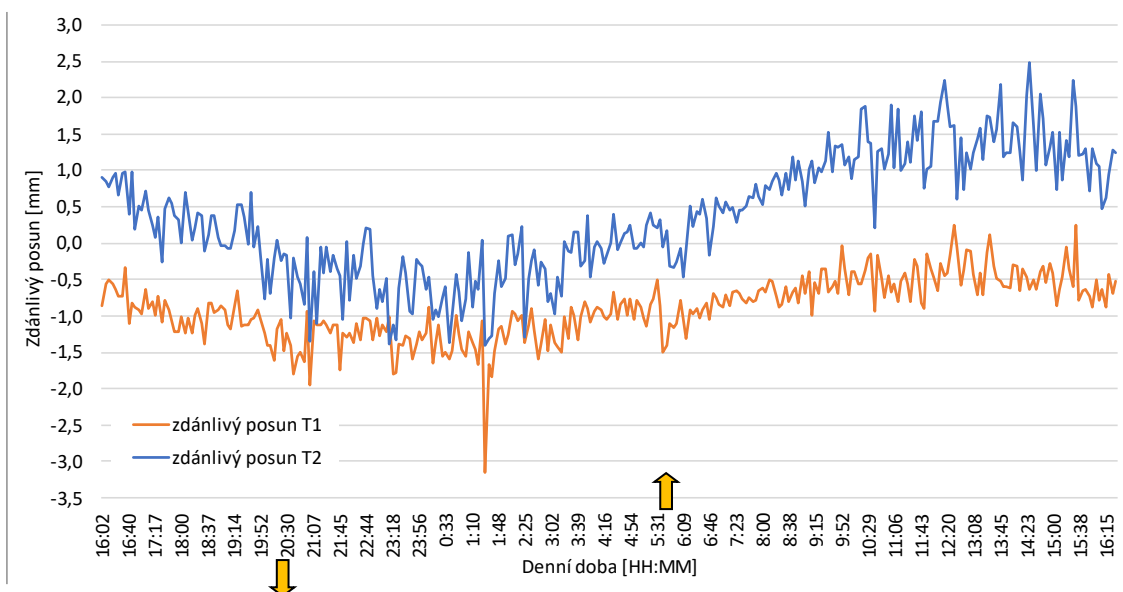


ČVUT v Praze – Fakulta stavební
Disertační práce – Měřické experimenty



Obr. 100 Výška bodu T2

Křivky jsou si nápadně podobné a připomínají sinusoidu. Očividně jsou závislé na denním trendu teploty. Po odečtení těchto dvou křivek získáme zdánlivé vertikální posuny pro každou z etap (viz Obr. 101).



Obr. 101 Zdánlivé posuny

Na tomto grafu můžeme vidět vztah vlivu refrakce na vzdálenosti cíle. I když jsou body T1 a T2 od sebe vzdálené pouze cca 30 metrů, tak je vidět, že vzdálenější cíl T2 vykazuje významnější posuny (trend sinusoidy se více rozevírá). Zajímavý je také velký výkyv okolo času 1:20, kdy dochází k významnému nárůstu vlivu refrakce. Tento ostrý výkyv je viditelný na obou grafech, nicméně jeho velikost je u cíle T1 poměrově výrazně vyšší.

Za povšimnutí stojí i fakt, že vliv refrakce se v nočních hodinách ustaluje, nicméně v první části noci (20:00 až cca 2:30) stále osciluje. Pro bod T1 odpovídá



zdánlivý posun průměrně cca $-1,25$ mm a pro bod T2 $-0,75$ mm. V následujících hodinách se vliv refrakce opět vyvíjí, ale křivka vykazuje menší oscilaci. To prakticky znamená, že se atmosféra relativně ustálila a dochází jen k pozvolnému vývoji.

Tento trend je pak nahrazen až v cca 8:00, kdy dochází k významnému nárůstu teplotního gradientu, jak bylo ukázáno výše. Následující denní průběh vlivu refrakce je opět více oscilující a také dosahuje u bodu T2 maximálních hodnot (až 2,5 mm).

Z křivek je patrná jejich vzájemná podobnost, ta je popsána jejich vzájemným korelačním koeficientem, který nabývá hodnoty 0,825. Korelace je tedy významně vyšší než v případě teplotních gradientů. To poukazuje na možnou použitelnost výpočtu jednoho posunu ze znalosti druhého pomocí diferenční metody.

8.8.3.4 Rozbory přesnosti pro totální stanici a nivelaci

Aby bylo možné prokázat vliv refrakce, tak byly spočítány rozbory přesnosti pro určované převýšení. Charakteristiky přesnosti totální stanice Trimble S9 odpovídají dříve uvedené Tab. 26.

Výsledné převýšení určené totální stanicí na body T1 a T2 určíme trigonometricky za použití stejných vztahů jako v kapitole 8.6.3.5 a výsledná směrodatná odchylka určených převýšení je $\sigma_{h_{TS,T1}} = 0,39$ mm a $\sigma_{h_{TS,T2}} = 0,54$ mm.

Ze znalosti výběrové směrodatné odchylky určení převýšení nivelací $S_{h_{N1,N2}} = 0,21$ mm a určených směrodatných odchylek reprezentující měření mezi N2 a body T1 a T2 získáme (opět dle vztahů uvedených v 8.6.3.5) směrodatnou odchylku celkového převýšení určeného nivelací mezi TS a T1 a T2 $\sigma_{\bar{h}} = 0,37$ mm (vychází pro obě převýšení stejně).

Mezní rozdíl $MAX\Delta_h$ s koeficientem spolehlivosti $u_p = 2$ pro převýšení nivelované \bar{h} a převýšení měřené pomocí TS h se vypočítá jako

$$MAX\Delta_h = u_p * \sqrt{\sigma_{\bar{h}}^2 + \sigma_h^2} \quad (8.14)$$

a je roven pro bod T1 1,08 mm a pro bod T2 1,31 mm. Ačkoli není tímto způsobem numericky prokázán vliv refrakce ve všech etapách, tak vzhledem k velikosti souboru a očividnému trendu obou převýšení není o prokázání vlivu prakticky pochyb.



8.8.4 Výpočet posunů

Jak bylo uvedeno v kapitole 7, lze použít pro výpočet vlivu refrakce několik metod. Jako nejpřesnější lze uvažovat metodu DRPV, která zohledňuje mnohem více vlivů než metody používající obecně pouze jednu teplotu (teplotní gradient) a uvažují její homogenitu v rámci celé dráhy paprsku. Předchozí grafy naznačují, že tento předpoklad není obecně splněn (a to dokonce ani v našem relativně homogenním prostředí). Výpočetní skripty jsou digitální přílohou této práce El. 1.

Jako poslední variantu výpočtu použijeme nově výše popsany diferenciální způsob. Tato metoda byla pro tuto práci navržena a vychází z jiného předpokladu. Uvažuje, že se vliv na měřené body, které jsou nad stejným (podobným) materiálem a ve stejném směru, projeví v rámci malého časového úseku podobně. A tudíž lze z části odhadnout vliv na jeden z bodů ze znalosti vlivu působícího na druhý.

V následujících kapitolách jsou postupně představeny výstupy všech metod a je provedeno jejich zhodnocení.

8.8.4.1 Výpočet pomocí jednoduchých fyzikálních vzorců

Do fyzikálních vzorců vstupují informace popisující stav atmosféry v době měření (teplota, tlak, teplotní gradient) a měřená data určená totální stanicí (zenitový úhel a vzdálenost). Tyto informace jsou získány postupem uvedeným v 8.8.3.2 a 8.8.3.3. Obdobným způsobem (lineární interpolací v čase) byl určen i tlak pro každou z etap.

Vzhledem k tomu, že z experimentu máme k dispozici více fyzikálních měření (měření teploty na více místech a v různých výškách), než kolik je ve standardním výpočtu potřeba, bylo provedeno více variant výpočtu s různým vstupem.

8.8.4.1.1 Böhmov vzorec

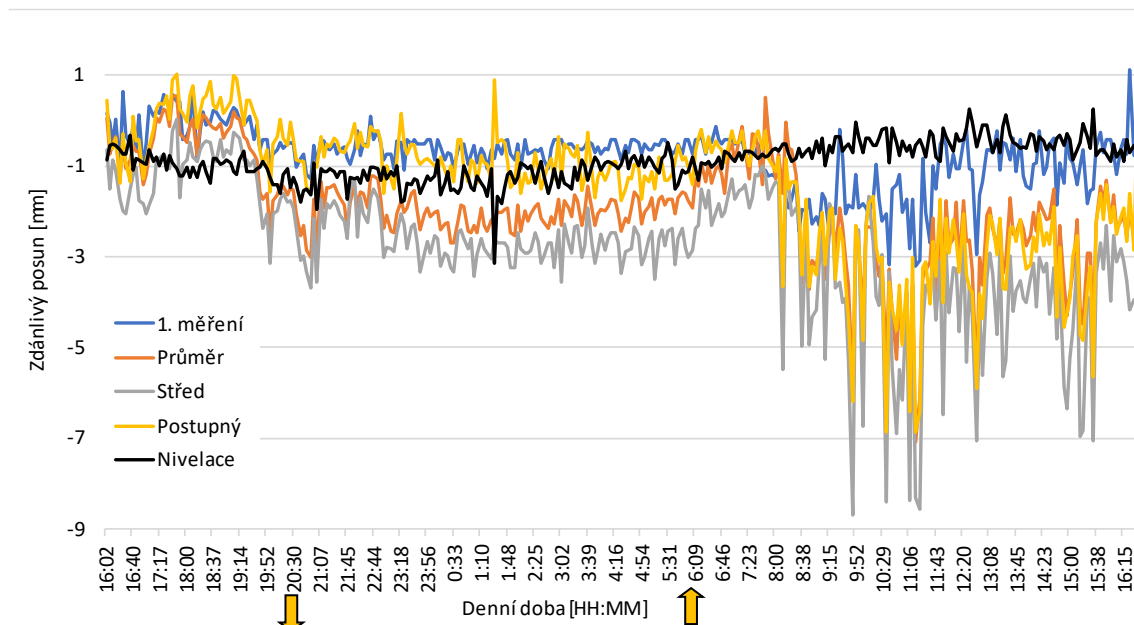
Zjednodušený vztah odvozený prof. Böhmem popsany v 7.2.1.2 nám umožňuje použít více variant výpočtu. V následující tabulce Tab. 33 jsou popsány vstupní parametry pro vybrané z nich, korelační koeficient oproti správnému zdánlivému posunu a dosažená kritéria přesnosti postihující přesnost výpočetní metody.



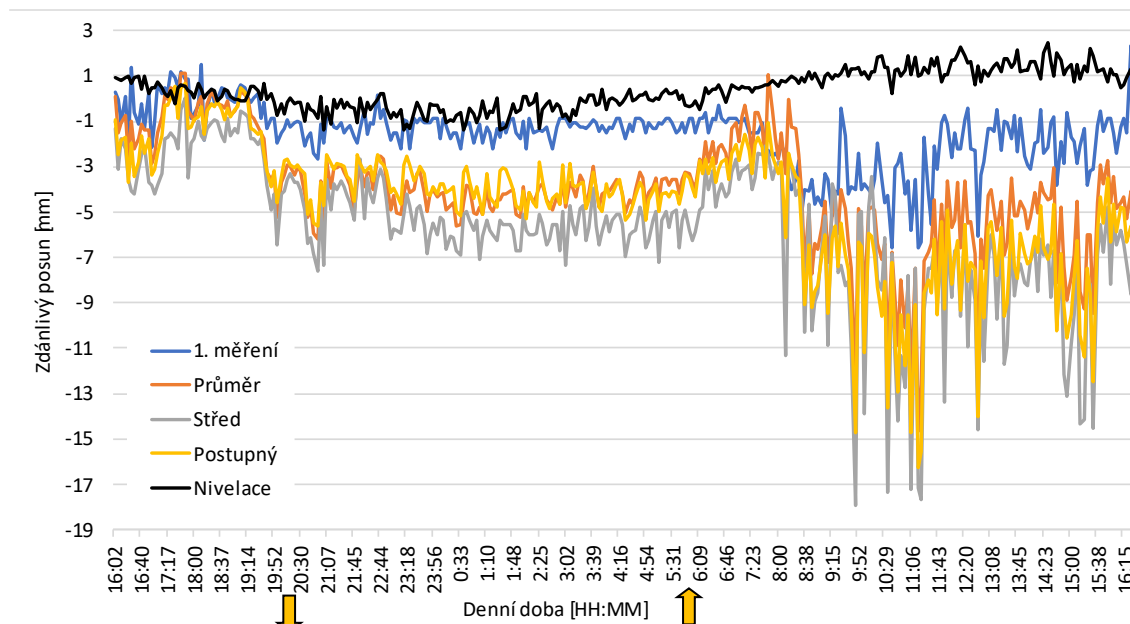
Tab. 33 Varianty výpočtu dle Böhmovy vzorce

Varianta popis vstupních dat	Bod T1			Bod T2		
	Korelační koeficient	Prům. abs. odchylka [mm]	RMS [mm]	Korelační koeficient	Prům. abs. odchylka [mm]	RMS [mm]
1. měření						
Použito pouze měření 1. soupravy S1 v nejvyšší úrovni (ve kterém probíhá dráha paprsku).	-0,295	0,73	0,88	-0,333	2,03	1,83
Průměr						
Použity průměry naměřených hodnot ze všech 4 souprav v nejvyšší úrovni.	-0,260	1,29	1,35	-0,272	4,42	2,78
Střed						
Použity pouze prostřední dvě soupravy (S2 a S3) v nejvyšší úrovni.	-0,376	1,97	1,71	-0,380	6,15	3,52
Postupný výpočet						
Pro první úsek mezi soupravami S1 a S2 byl určen posun a z něj zpětně spočítán upravený zenitový úhel. Tento zenitový úhel slouží jako vstupní pro úsek následující řešený stejným způsobem.	-0,628	1,34	1,77	-0,548	5,07	3,45

Výsledné vypočítané zdánlivé posuny jsou zobrazeny v Obr. 102 a Obr. 103 (černě jsou zobrazeny správné zdánlivé posuny určené rozdílem měření TS a nivelace).



Obr. 102 Porovnání zdánlivých posunů bodu T1 a Böhmovy vzorce



Obr. 103 Porovnání zdánlivých posunů bodu T2 a Böhмова vzorce

Z tabulky i grafů je patrné, že v tomto případě je krajně nevhodné provádět výpočet oprav pomocí tohoto vzorce, jelikož ve velké části případů dochází ke zhoršení výsledků oproti surovému měření. Především opravy vycházející v čase od 8:00 až do konce experimentu v 16:00 jsou násobně větší než skutečný vliv refrakce.

8.8.4.1.2 Kharaghaniho vztah

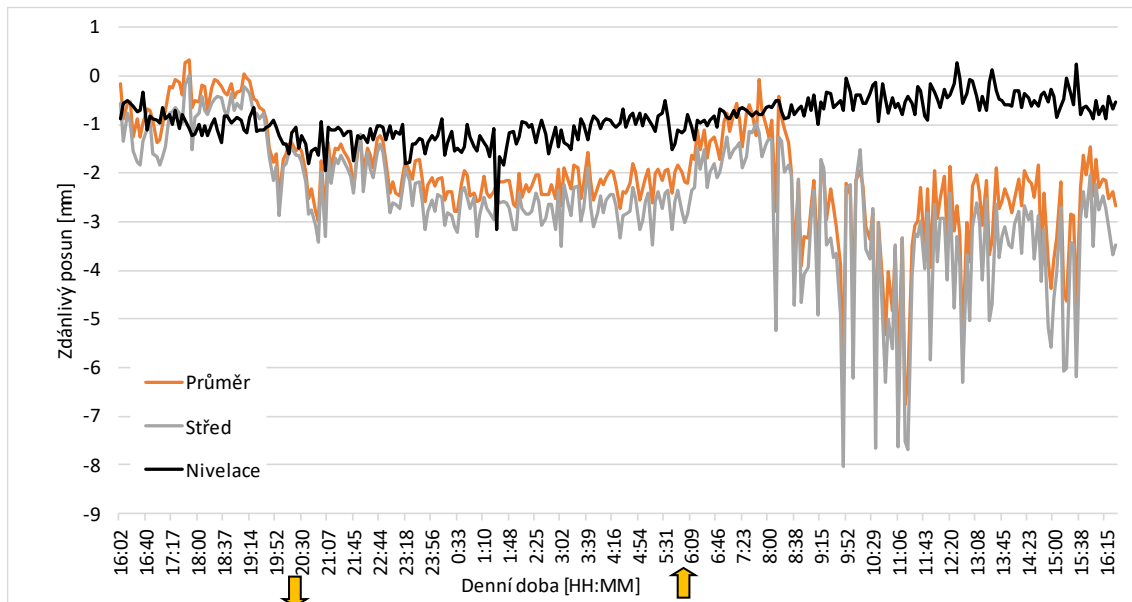
Podobných výsledků lze obecně dosáhnout pomocí výpočtu odvozeného z derivací indexu lomu. Vzhledem k tomu, že výpočty metodou prof. Böhma nebyly v žádné variantě vhodné, tak byly pro Karaghaniho vzorec provedeny výpočty jen ve dvou variantách (viz Tab. 34).

Tab. 34 Varianty výpočtu dle Kharaghaniho vztahu

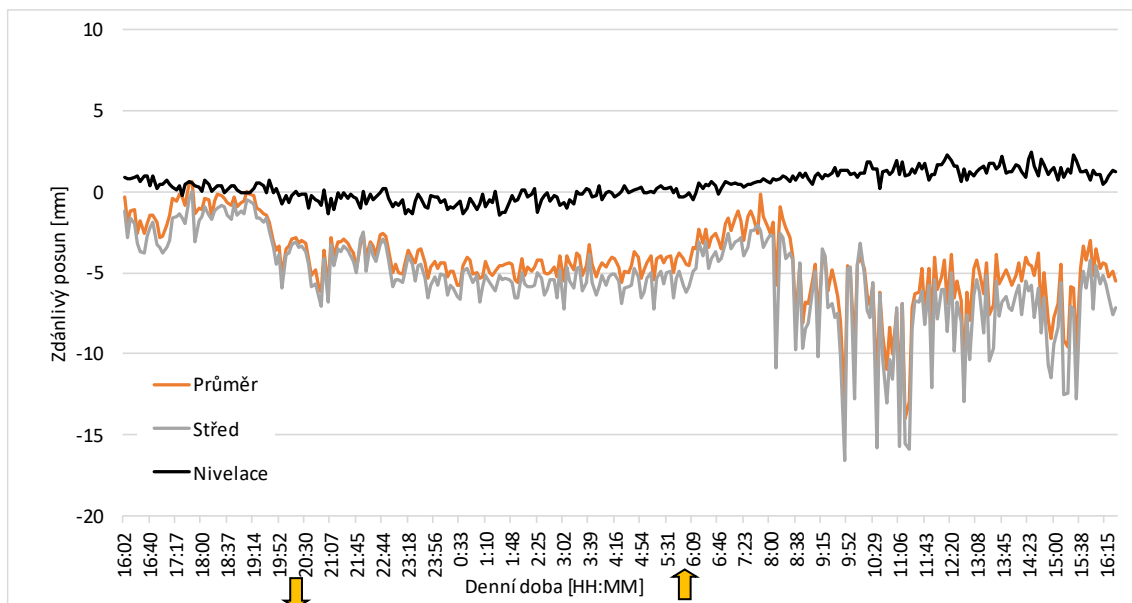
Varianta popis vstupních dat	Bod T1			Bod T2		
	Korelační koeficient	Prům. abs. odchylka [mm]	RMS [mm]	Korelační koeficient	Prům. abs. odchylka [mm]	RMS [mm]
Průměr						
Použity průměry naměřených hodnot ze všech 4 souprav v nejvyšší úrovni.	-0,276	1,35	1,33	-0,276	4,66	2,72
Střed						
Použity pouze prostřední dvě soupravy (S2 a S3) v nejvyšší úrovni.	-0,342	1,79	1,55	-0,337	5,74	3,18



Výsledné vypočítané zdánlivé posuny jsou zobrazeny v Obr. 104 a Obr. 105 (černě jsou zobrazeny správné zdánlivé posuny určené rozdílem měření TS a nivelace).

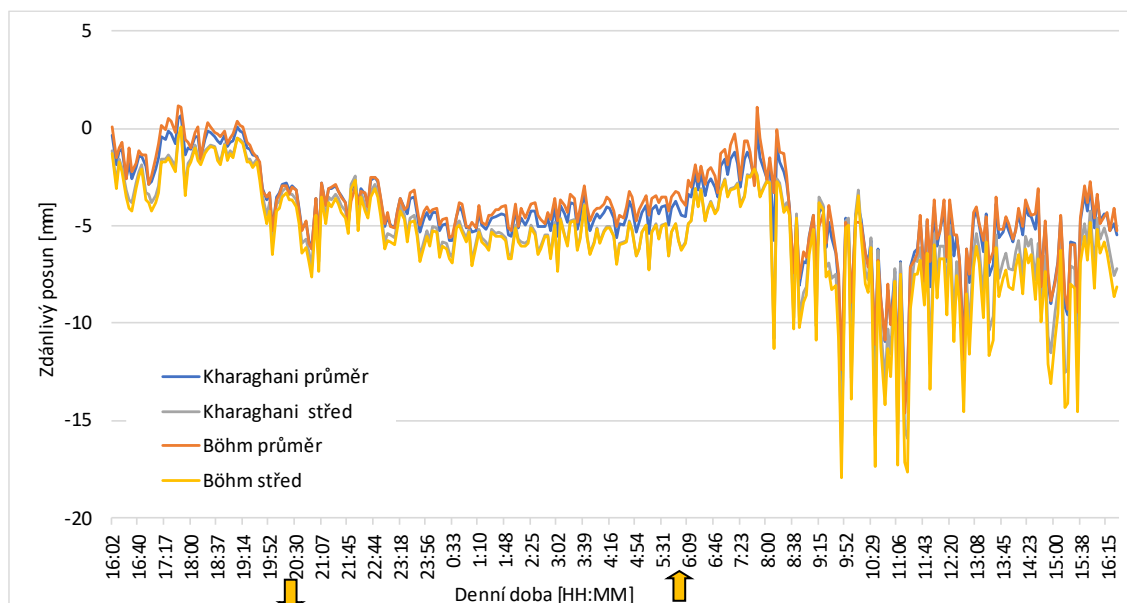


Obr. 104 Porovnání zdánlivých posunů bodu T1 a Kharaghaniho vztahu



Obr. 105 Porovnání zdánlivých posunů bodu T2 a Kharaghaniho vztahu

Výsledky i jejich přesnosti jsou prakticky stejné jako u předchozího výpočtu. To je také zcela jasně vidět i z porovnání obou metod pro cíl T2 na Obr. 106.



Obr. 106 Porovnání výpočtu Böhmova vzorce a Kharaghaniho vztahu

Předchozí vyobrazení a data prokazují, že ani jeden z jednoduchých vzorců není možné v tomto případě aplikovat. Důvodem je pravděpodobně nepostihnutečnost přízemní úrovně atmosféry anebo nedostatečná přesnost přibližných vztahů.

8.8.4.2 DRPV

Metoda výpočtu DRPV oproti jednoduchým fyzikálním vzorcům pracuje s teplotou (gradienty) v prostoru a umožňuje připravit teplotní (gradientní) pole, ve kterém následně probíhá výpočet iterativní formou. Otázkou je, jak věrohodně časově a prostorově postihnout teplotní pole. Předchozí experiment prokázal, že pouze dvě soupravy pro měření teploty nestačují a není možné jimi podchytit turbulentní a proměnné stavy v přízemní úrovni atmosféry. V tomto případě byla omezena vzdálenost mezi TS a pozorovanými body a bylo použito 4 souprav pro měření teploty. Iterativní část výpočtu je již popsána v kapitole 7.2.1.4.

8.8.4.2.1 Úpravy výpočtu

Oproti výpočtu z experimentu v kapitole 8.6 bylo nutné výpočetní skript upravit tak, aby bylo možné vypočítat průchod paprsku v prostředí, které je definované 4 soupravami pro měření teplotního gradientu. Další změnou byl výpočet ve dvou směrech namísto jednoho.

Samotné teplotní pole pak bylo vypočítáno tak, že teploty byly konstantní vždy v kolmém směru vůči ose postavení souprav. Teplota se tedy vyvíjela pouze ve směru podélném. Vývoj teploty byl pak realizován prostou interpolací mezi dvěma sousedními soupravami. Prakticky velmi podobně, jako v případě pokusu v kapitole 8.6.4.3.1 (s ohledem na vzdálenost od souprav a výšky nad terénem, která byla určena z předchozího zaměření tachymetrie).

Aby bylo možné snadno vypočítat vliv na druhý bod T2 byla provedena shodnostní transformace, kterou byla celá oblast (body, podklad tachymetrie, pozice



souprav, ...) stočena tak, aby osa X procházela spojnicí TS1 a T2. Díky tomu došlo i ke stočení ekviterm. Výpočet DRPV je samozřejmě možné realizovat i ve 3D prostoru, nicméně pak výrazně vzrůstá jeho časová náročnost. Proto bylo na základě předchozích zkušeností rozhodnuto o ponechání výpočtu ve 2D prostoru a byla pouze provedena úprava stočení pomocí transformace. Tento krok by obecně nemohl být použit, protože nevhodně zjednodušuje (respektive upravuje) teplotní pole. Vzhledem k tomu, že je zde osa souprav prakticky rovnoběžně s osou záměry na bod T1 a téměř ve stejném směru i vůči T2, lze toto zanedbat.

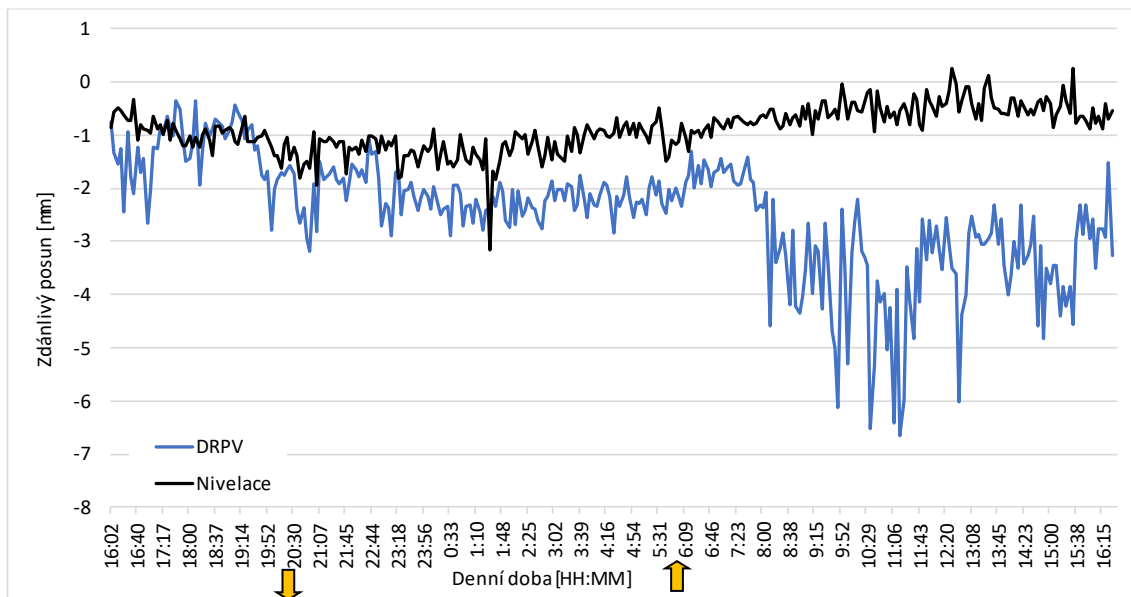
Výpočet iterace byl prováděn s krokem 1 cm a 0,5 cm pro kontrolu. Oba výpočty poskytovaly prakticky stejné výsledky. Stejně tak byl výpočet proveden jak nad surovými daty teplot (určenými pouze interpolací pro čas měření TS), tak nad teplotami určenými pomocí klouzavého průměru s velikostí okna 5, 10 a 20 etap měření. Všechny tyto varianty poskytovaly prakticky stejné hodnoty jen s malými odlišnostmi a pro prezentování dat bezvýznamnými odchylkami.

8.8.4.2.2 Výsledky DRPV

Výsledkem DRPV je tedy skutečná výška cílů T1 a T2 ve všech etapách tak, jak ji podchycuje daný výpočet. Pro potřebu porovnání jsou na Obr. 107 a Obr. 108 prezentované již přepočítané zdánlivé vertikální posuny. Statistická kritéria hodnotící rozdíly oproti reálnému vlivu refrakce (z měření nivelací) jsou uvedena v Tab. 35.

Tab. 35 Varianty výpočtu dle DRPV

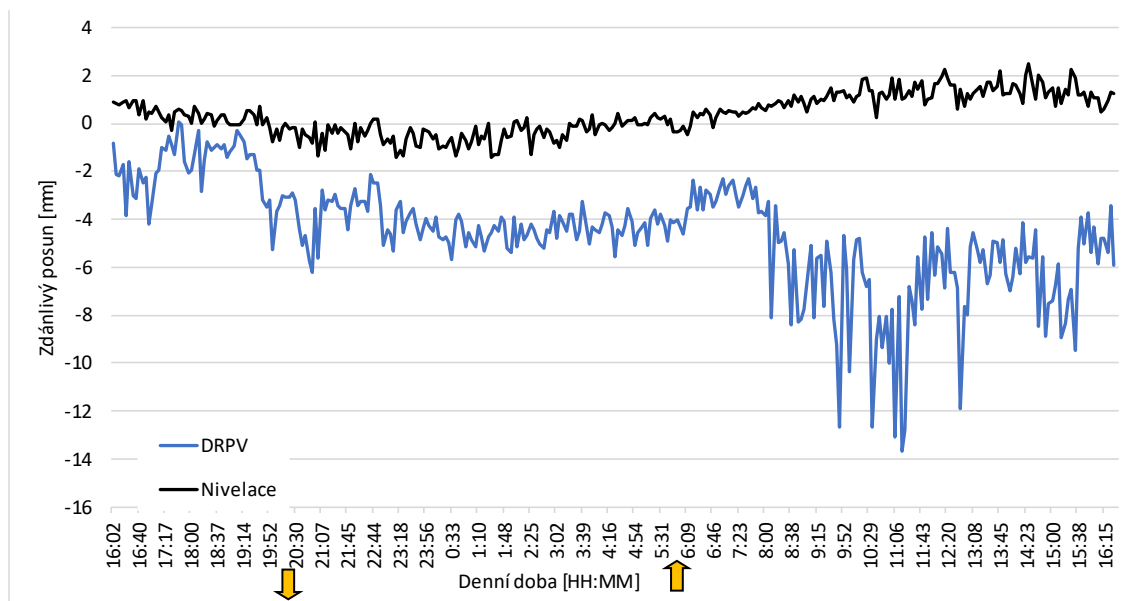
Kritérium	Bod T1	Bod T2
Korelační koeficient	-0,418	-0,398
Průměrná absolutní odchylka [mm]	1,61	4,93
RMS [mm]	1,33	2,71



Obr. 107 Porovnání zdánlivých posunů bodu T1 a DRPV



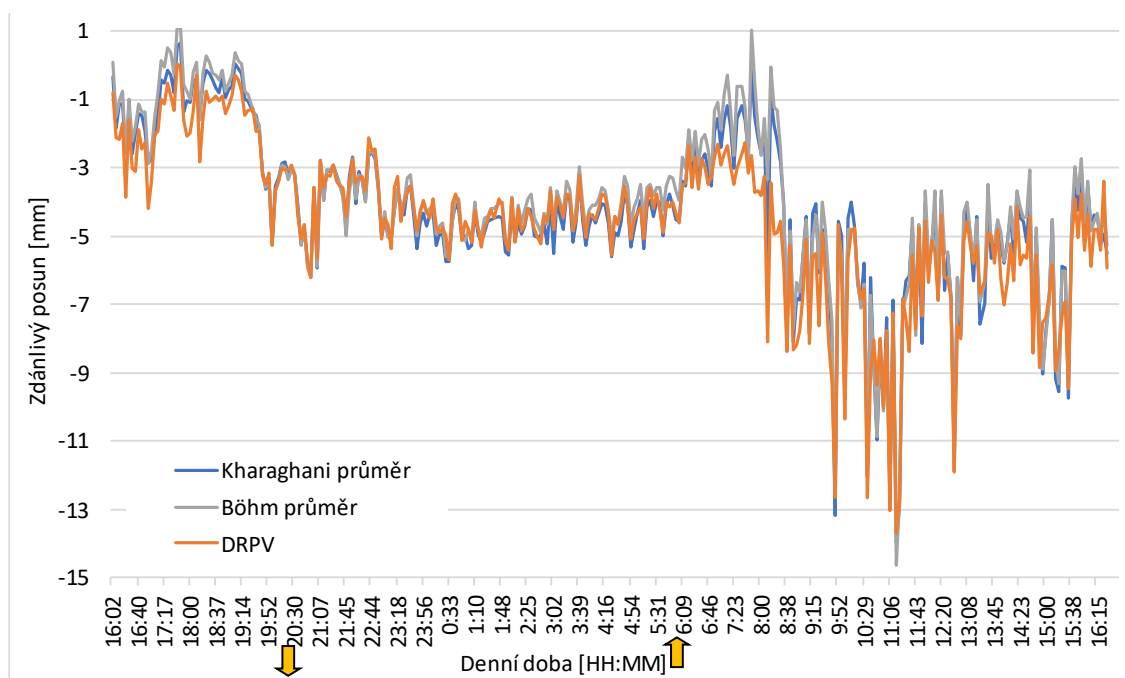
ČVUT v Praze – Fakulta stavební
Disertační práce – Měřické experimenty



Obr. 108 Porovnání zdánlivých posunů bodu T2 a DRPV

Z obou obrázků je vidět, že ani výpočet pomocí DRPV nedokázal vhodně postihnout vliv refrakce. Hodnoty oprav posunů nabývají stejně jako u předchozích metod mnohonásobně vyšších hodnot, než jaké reálně nastaly. Výsledky vykazují stejně nedostačující přesnost jako výše uvedené jednodušší metody.

Nicméně je zřejmé, že zdánlivé posuny určené těmito metodami jsou si velmi blízké (viz Obr. 109).



Obr. 109 Porovnání metod výpočtů



Korelační koeficient mezi výpočtem DRPV a oběma dalšími metodami je v obou případech více než 0,94. To je prakticky důkaz, že všechny metody využívající k výpočtu teplotní gradient určují hodnotu vertikálního posunu velmi podobnou fyzikální úvahou. Nicméně ani jedna z nich nedokáže v běžném geodetickém prostředí (jako například u uvedeného pokusu) věrohodně určit vliv refrakce. Důvodem je, jak hodnoty gradientů napovídají, že přízemní úroveň atmosféry není možné vhodně a dostatečně přesně podchytit pomocí současného vybavení pro měření teploty. Teplota určená v jednom bodě nebude jednoduše matematicky závislá na teplotě určené v bodě následujícím. Tudíž jsou výpočetní metody zatíženy naměřenými údaji teploty, které ovšem reprezentují jen daný bod (malý rozsah okolí). Teplotní gradient není homogenní ve směru šíření paprsku a chová se významně nestabilně a náhodně, a proto jsou i výsledné zdánlivé posuny nepřesné (ba přímo chybné) a není možné je použít pro výpočet oprav refrakce nebo její odhad.

Z experimentu lze vyvodit, že zvyšování počtu měřících souprav pro určování teplotního gradientu pravděpodobně nepovede ke zlepšení výsledků. Tudíž tento postup nelze doporučit pro využití v praxi. Jistou možností by bylo použití těchto metod v interiérech, kde se teplota (teplotní gradient) pravděpodobně chová jiným způsobem a lze očekávat menší proměnlivost.

8.8.4.3 Výpočet pomocí diferenční metody

Metoda je popsána v kapitole 7.3, kde je také zmíněno, že jde o autorovu „nově“ použitou metodu vycházející ze zkušenosti v předchozích experimentech a z logiky, kterou používají GNSS aparatury při diferenčním řešení výpočtu své pozice.

Pro použití v přízemní úrovni atmosféry však tento postup zatím použit nebyl a ani nebyly stanoveny předpoklady, za kterých je možné tuto metodu případně použít. Proto byl tento pokus prakticky prvním a testovacím, zda je vůbec možné či vhodné takto uchopit problematiku geodetické refrakce.

Výše uvedené korelace mezi skutečnými posuny bodů T1 a T2 (nabývající hodnoty 0,825) jsou slibným začátkem pro použitelnost této metody. Je potřeba si uvědomit, že cíle T1 a T2 nebyly měřeny ve stejný okamžik, ale vždy proběhlo měření v obou polohách po sobě. Tudíž i v tomto krátkém časovém rozestupu (cca 30 až 100 s) mohlo dojít ke změně atmosféry, a tím i ke změně velikosti vlivu refrakce. Stejně tak jsou od sebe oba cíle posunuty o cca 30 metrů, tudíž vliv této části trajektorie (ani jeho poměrový vliv) se do bližšího bodu T1 logicky nemohl projevit.

Pro výpočet bylo použito strojové učení – konkrétně neuronových sítí. Jak bylo popsáno v kapitole 7.3.1, bylo by možné použít i jiných prostředků (například polynomu), nicméně neuronové sítě jsou méně náchylné na vliv lidského faktoru a obecně poskytují vyšší přesnost a spolehlivost v hledání vzorů (vztahů).

Pro samotný výpočet bylo přesto potřeba neuronovou síť nastavit, jelikož existuje celá řada variant učících algoritmů, variací s použitím různého počtu neuronů a jejich vrstev a samozřejmě i úprava a volba vstupních dat. Z toho důvodu byla postupně řešena celá škála variací výpočtu neuronových sítí s cílem nalézt optimální nastavení – optimální model pro výpočet. V následujících kapitolách jsou prezentovány vybrané variace zadání neuronových sítí a jejich zhodnocení. Pro všechny výpočty byl použit algoritmus neuronové sítě „Online standard backpropagation“ a výpočetní



toolbox pro software Scilab „ANN Toolbox“ ve verzi 0.5 [72][73][74]. Vybrané výpočetní skripty jsou elektronickou přílohou této práce El. 2.

Vstupními neurony byly variace z měřených veličin (teploty, teplotní gradienty, tlak, vertikální zdánlivý posun referenčního bodu (T2), denní doba, průběžný čas experimentu), výstupním neuronem pak byl vertikální zdánlivý posun pozorovaného bodu (T1). Teploty a teplotní gradienty byly použity jen ty, které byly určovány ve výšce trajektorie paprsku (teplota a teplotní gradient nejvyššího úseku měřeného na dané soupravě). Zenitový úhel úmyslně nebyl do výpočtu vložen, jelikož jeho změna přímo definuje posun. Obecně však nedefinuje pouze zdánlivý posun (který chceme určit) ale celkový měřený. V případě měření deformací by výsledkem byl posun zdánlivý + skutečný, což není požadovaným výstupem.

Problémem použití neuronových sítí v tradiční geodézii je zejména počet opakování, který se v našem oboru běžně uplatňuje. Pro neuronové sítě, jak již bylo vysvětleno, je potřeba určit dostatečně velkou tréninkovou množinu (počet opakování) a k ní odpovídající množinu testovací. Tento experiment byl proto navržen tak, aby toto splňoval co možná nejlépe, ale zároveň, aby byl stále technicky proveditelný. Díky tomu se podařilo připravit 308 etap měření, které budou následně rozděleny do trénovací a testovací množiny v různém poměru.

8.8.4.3.1 Volba vstupních dat

Jako první bylo potřeba rozhodnout o tom, jaké parametry nechat vstoupit do výpočtu neuronové sítě – kolik vstupních neuronů použít. Vzhledem k tomu, že máme k dispozici „jen“ 308 etap měření bylo by vhodné počet neuronů (i těch vstupních) omezit a tím snížit náročnost výpočtu.

Pro tuto volbu byly definovány 4 varianty modelů neuronových sítí odlišené počtem neuronů a vrstev. Počet iterací trénování modelu byl stanoven na 1200. Přičemž data byla rozdělena na trénovací množinu $\langle 1;100 \cup 250;308 \rangle$ a zbytek byl použit na množinu testovací $\langle 101;249 \rangle$ pro potřeby vyhodnocení. V každé variantě modelu byl proveden výpočet pro různé kombinace vstupních dat, aby bylo možné stanovit, která vstupní data mají pro výpočet význam, a která výsledky neovlivní (nebo dokonce zhorší).

Byly provedeny výpočty neuronových sítí s různými kombinacemi veličin na vstupu a v různém nastavení. Výsledky jsou prezentovány v tabulce Tab. 36. Sloupec nastavení modelu definuje počet skrytých vrstev a neuronů v nich. Následuje číslo konkrétní varianty výpočtu (celkem 44 variant). Další sloupce definují zahrnutí či nezahrnutí daného měření do vstupu (neuronu), přičemž 1 znamená zahrnutí a 0 nepoužití do vstupních dat (značka „m“ znamená použití průměru z daných hodnot). Poslední čtyři sloupce definují přesnost modelu vždy ve variantě porovnávací predikovaná a vstupní data jak pro tréninkovou, tak pro testovací množinu.



Tab. 36 Varianty vstupních dat

Nastavení modelu	Prům. abs. odchylka test. [mm]	Prům. abs. odchylka trén. [mm]	RMS testovací množina [mm]	RMS tréninková množina [mm]	Tlak	Teplota S4	Teplota S3	Teplota S2	Teplota S1	Teplotní gradient S4	Teplotní gradient S3	Teplotní gradient S2	Teplotní gradient S1	Průběžný čas exp.	Denní doba	Posun bod T2	Varianta
[In, 5, Out]	1	0,18	0,17	0,25	0,21	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1
	2	0,18	0,17	0,25	0,22	0	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1
	3	0,19	0,18	0,27	0,22	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
	4	0,26	0,17	0,33	0,21	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0	1	1
	5	0,24	0,17	0,30	0,22	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0	1	0
	6	0,23	0,19	0,31	0,24	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	0	1
	7	0,17	0,17	0,24	0,21	m	m	m	m	0	0	0	0	0	1	1	1
	8	0,32	0,16	0,38	0,20	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1
	9	0,20	0,16	0,26	0,20	0	m	m	m	1	1	1	1	1	1	1	1
	10	0,21	0,18	0,29	0,22	0	0	0	0	0	0	m	m	0	1	1	1
	11	0,17	0,18	0,23	0,22	0	m	m	m	0	0	0	0	0	1	1	1
[In, 15, 15, Out]	12	0,21	0,17	0,27	0,21	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1
	13	0,17	0,18	0,24	0,22	0	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1
	14	0,20	0,18	0,28	0,22	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
	15	0,24	0,17	0,30	0,21	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0	1	1
	16	0,18	0,17	0,25	0,22	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0	1	0
	17	0,45	0,18	0,54	0,23	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	0	1
	18	0,18	0,17	0,25	0,22	1	m	m	m	0	0	0	0	0	1	1	1
	19	0,25	0,17	0,32	0,21	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1
	20	0,18	0,17	0,24	0,21	0	m	m	m	0	0	0	0	1	1	1	1
	21	0,24	0,18	0,31	0,22	0	0	0	0	0	m	m	m	0	1	1	1
	22	0,18	0,17	0,24	0,21	0	m	m	m	0	0	0	0	0	1	1	1
[In, 15, 15, 15, 15, Out]	23	0,21	0,17	0,28	0,22	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1
	24	0,18	0,18	0,25	0,22	0	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1
	25	0,22	0,17	0,30	0,22	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
	26	0,21	0,17	0,28	0,22	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0	1	0
	27	0,19	0,18	0,26	0,22	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0	1	0
	28	0,33	0,18	0,40	0,23	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	0	1
	29	0,19	0,17	0,26	0,22	1	m	m	m	0	0	0	0	0	1	1	1
	30	0,23	0,17	0,31	0,21	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1
	31	0,23	0,16	0,30	0,20	0	m	m	m	0	0	0	0	1	1	1	1
	32	0,19	0,18	0,26	0,22	0	0	0	0	0	m	m	m	0	1	1	1
	33	0,18	0,18	0,25	0,22	0	m	m	m	0	0	0	0	0	1	1	1

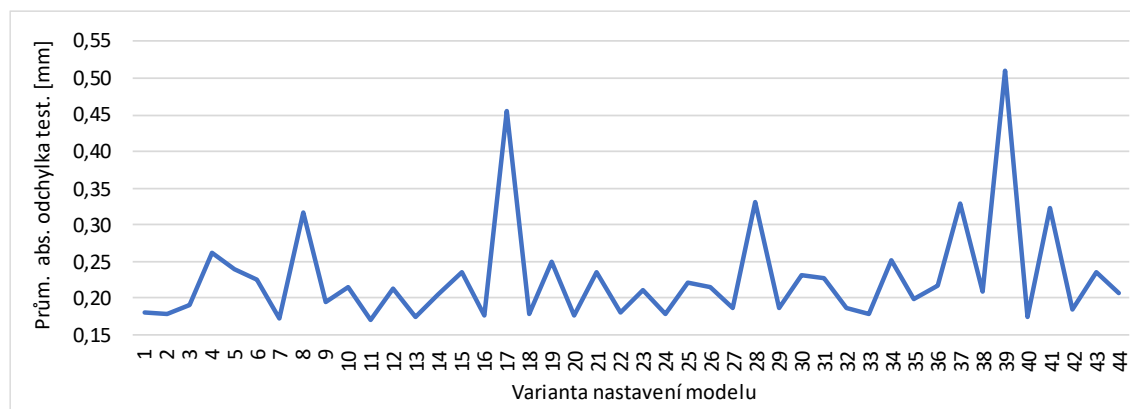


ČVUT v Praze – Fakulta stavební
Disertační práce – Měřické experimenty

[t _h O '09 'u]	34	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0,21	0,32	0,17	0,25
	35	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0,22	0,26	0,18	0,20
	36	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0,22	0,29	0,17	0,22
	37	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0,21	0,41	0,17	0,33
	38	1	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0,22	0,28	0,17	0,21
	39	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0,23	0,64	0,18	0,51
	40	1	1	1	0	0	0	0	m				1	0,21	0,25	0,17	0,17
	41	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0,20	0,38	0,16	0,32
	42	1	1	1	1	1	1	1	m				0	0,20	0,25	0,16	0,18
	43	1	1	1	m				0	0	0	0	0	0,21	0,31	0,17	0,24
	44	1	1	1	m				m				0	0,21	0,26	0,17	0,21

Z tabulky jasně vyplývá, že výpočty, realizované bez vstupního neuronu obsahujícího zdánlivý posun bodu T2, nevedou k dobrým výsledkům, což bylo předpokládaným výsledkem a naplňuje to představu o fungování diferenční metody. Stejně tak nezahrnutí tlaku do výpočtu nezpůsobuje znatelnou ztrátu přesnosti. Naopak je zajímavé, že není viditelný rozdíl mezi použitím všech teplot, pouze průměru teplot, případně použitím všech teplotních gradientů, nebo pouze průměru. Ze všech variant modelu vycházely dobře varianty, kdy byly do výpočtu zahrnuty vektory obsahující posun bodu T2, denní dobu, průběžný čas experimentu a pak vektor obsahující informaci o teplotě nebo teplotním gradientu (ačkoli zřejmě postačuje průměr z měřených veličin). Vzhledem k tomu, že je prakticky mnohem pracnější měřit teplotní gradient než samotnou teplotu, tak budeme v následujících variantách užívat vstup měřené teploty.

Z grafu Obr. 110 můžeme snadno vyčíst, že je výpočet dobře určen i variantami používajícími jednodušší modely čítající méně neuronů. Naopak modely čítající více neuronů nemusejí udávat tak dobré výsledky z důvodu přeučení. Nicméně je vidět, že všechny modely by byly použitelné pro řešení této úlohy.



Obr. 110 Porovnání průměrů abs. odchylek jednotlivých variant

Výše uvedená zjištění nás vedou k potřebě dalšího porovnání, které bude definovat jak málo parametrů (z výše vybraných) lze použít, aby bylo možné získat relevantní výsledky.



8.8.4.3.2 Minimální vhodné nastavení vstupních parametrů

Jelikož jsme určili, že i s jednodušším modelem je možné správně určit posuny, tak byl u této zkoušky použit model nastavený na jednu skrytou vrstvu o pěti neuronech. Zbývající nastavení popisující počet iterací a rozdělení na tréninkovou a testovací množinu zůstávají stejná. Z minulého pokusu víme, že je důležité zahrnout do vstupních dat zdánlivý posun na bod T2 (referenční) a vhodné se zdá i použití informací o času, denní době a teplotě. Konkrétní varianty a jejich výsledky jsou prezentovány v Tab. 37.

Tab. 37 Varianty minimálního vhodného vstupu

Nastavení	Varianta	Posun bod T2	Denní doba	Průběžný čas experimentu	Teplota S1	Teplota S2	Teplota S3	Teplota S4	RMS tréninková množina [mm]	RMS testovací množina [mm]	Prům. abs. odchylka trén. [mm]	Prům. abs. odchylka test. [mm]
[In, 5, Out]	1	1	1	1	0	0	0	0	0,222	0,274	0,179	0,197
	2	1	1	0	0	0	0	0	0,220	0,272	0,177	0,203
	3	1	0	1	0	0	0	0	0,228	0,232	0,183	0,161
	4	1	0	0	0	0	0	0	0,230	0,237	0,182	0,168
	5	1	1	1	1	0	0	0	0,218	0,236	0,177	0,167
	6	1	1	0	1	0	0	0	0,219	0,238	0,176	0,179
	7	1	0	1	1	0	0	0	0,225	0,237	0,179	0,172
	8	1	0	0	1	0	0	0	0,229	0,274	0,181	0,214
	9	1	1	1	m				0,218	0,231	0,177	0,166
	10	1	1	0	m				0,218	0,245	0,176	0,189
	11	1	0	1	m				0,226	0,236	0,180	0,174
	12	1	0	0	m				0,228	0,275	0,180	0,213

Tabulka dokládá několik zajímavých informací. První z nich je, že téměř nejlepšího výsledku bylo dosaženo s naprostým minimem vstupních informací – pouze se zdánlivým posunem bodu T2. To naznačuje, že v případě našeho experimentu by bylo možné definovat přímý vztah mezi posunem pozorovaného bodu T1 a posunem referenčního bodu T2. To samozřejmě nemusí obecně platit a zde vděčíme pravděpodobně vhodnému rozmístění cílů a vhodně vybranému (homogennímu) povrchu terénu. Nejlepším se ukázala varianta 3, která používá zdánlivý posun bodu T2 a průběžný čas měření. Zdá se, že průběžný čas měření přidává do modelovaného vztahu informaci o „postupném“ vlivu refrakce. Podobně dobrý výsledek nám poskytují i varianty 5 a 9, které k vstupním datům přidávají denní dobu a buď jednu teplotu určenou na S1, nebo průměr všech teplot v dané výšce. Vliv denní doby by mohl být více důležitý, pokud by měření probíhalo více dní a bylo by z něj možné „vyčíst“ vliv denní doby na refrakci. Hůře naopak dopadly varianty, kdy byla vypuštěna informace o průběžném času měření.

Prakticky vzato vykrytalizovaly dva přístupy pro vhodný vstup. Jedním a ryze praktickým se jeví použití výhradně známého posunu bodu T2 a druhým je navíc měření denní doby (která je zpravidla u měření již evidována), průběžného času pokusu



(který jde snadno spočítat) a jedné teploty měřené u totální stanice. Je zde také nutné připomenout, že se lepší varianty liší v průměrných absolutních odchylkách v hodnotách setin milimetrů. To samozřejmě nemá praktický význam, nicméně nás to směřuje k ideálnímu řešení, které by v případné aplikaci mohlo být vhodným odrazovým můstkem.

S těmito poznatky se můžeme dostat k dalšímu testu, který bude určovat konkrétní vhodné množství neuronů pro řešení této úlohy.

8.8.4.3.3 Nastavení vhodného počtu neuronů

Z minulého výpočetního pokusu bylo usouzeno, že vhodným zvolením vstupních dat se jeví zdánlivý posun bodu T2, informace o času a denní době a význam nese i informace o teplotě. Velmi dobře vyšlo také nastavení vstupu pouze pro zdánlivý posun. Další nastavení definující model byla ponechána stejná jako u předchozího výpočtu. Dvě zmíněné varianty vstupu jsou dále testovány pro různý počet neuronů, porovnání je prezentováno v Tab. 38.

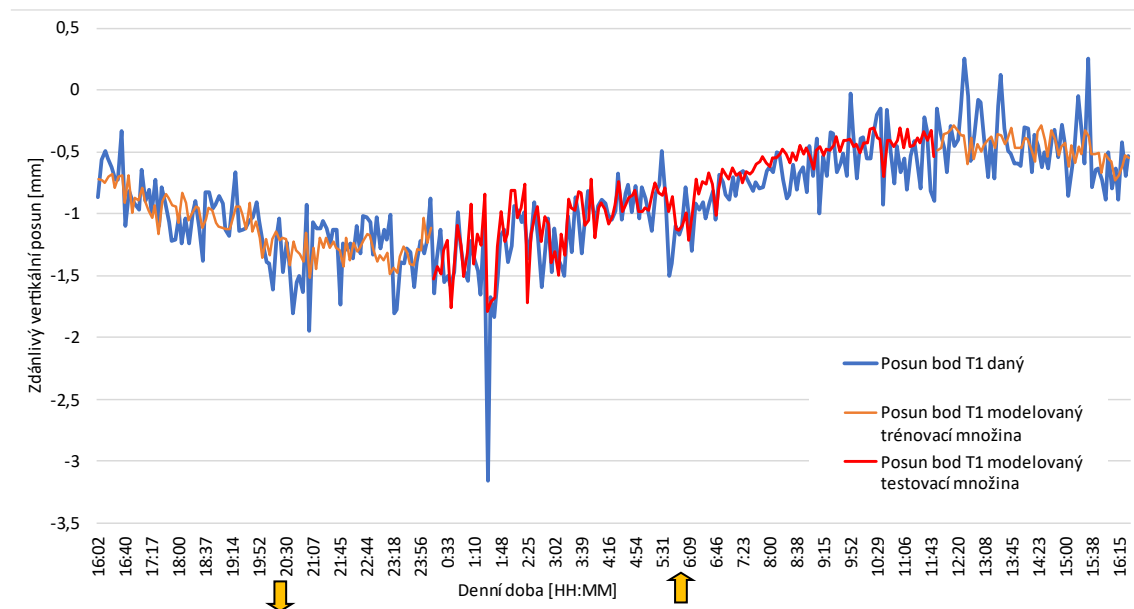
Tab. 38 Varianty počtu neuronů skryté vrstvy

Počet neuronů	Posun bod T2	Denní doba	Průběžný čas exp.	Teplota S1	RMS tréninková množina [mm]	RMS testovací množina [mm]	Prům. abs. odchylka trén. [mm]	Prům. abs. odchylka test. [mm]
1	1	0	0	0	0,229	0,241	0,181	0,176
2	1	0	0	0	0,231	0,237	0,183	0,168
3	1	0	0	0	0,229	0,239	0,181	0,174
4	1	0	0	0	0,230	0,239	0,181	0,176
5	1	0	0	0	0,230	0,236	0,181	0,171
6	1	0	0	0	0,228	0,245	0,181	0,178
7	1	0	0	0	0,229	0,238	0,181	0,170
8	1	0	0	0	0,231	0,235	0,182	0,170
9	1	0	0	0	0,230	0,237	0,181	0,172
10	1	0	0	0	0,229	0,238	0,181	0,172
1	1	1	1	1	0,221	0,257	0,178	0,175
2	1	1	1	1	0,222	0,260	0,179	0,178
3	1	1	1	1	0,218	0,230	0,177	0,166
4	1	1	1	1	0,217	0,233	0,177	0,169
5	1	1	1	1	0,216	0,245	0,175	0,187
6	1	1	1	1	0,218	0,233	0,177	0,172
7	1	1	1	1	0,217	0,236	0,175	0,171
8	1	1	1	1	0,217	0,234	0,176	0,168
9	1	1	1	1	0,221	0,232	0,179	0,168
10	1	1	1	1	0,217	0,235	0,175	0,174



Opět zde můžeme pozorovat, že výpočet je napříč variantami poměrně stabilní a výsledné průměrné absolutní odchylky se pohybují okolo 0,17 mm. Nicméně je zde vidět, že obecně dává o něco lepší výsledky varianta používající jako vstupní data zdánlivý posun bodu T2, denní dobu, průběžný čas experimentu a teplotu ve výšce signálu měřenou na konstrukci S1. Ještě lze pozorovat, že takto postavený model poskytuje o něco lepší výsledky v případě, kdy má více než 2 neurony. Jeden či dva neurony zřejmě nestačí a model je málo podmíněn. Nejlepší výsledek poskytovala varianta se 3 neurony a velmi dobře vychází i varianty se 4, 8 a 9 neurony ve skryté vrstvě.

Z výše uvedených tabulek je zřejmé, že jsme v tomto případě prakticky potvrdili myšlenku, na které byla diferenční metoda postavena – je možné v podobném prostředí a v krátkém časovém rozestupu měření určit „vztah“ mezi vlivem refrakce působící na bod T2 (referenční) a T1 (určovaný). Pro variantu se třemi neurony jsou výsledky neuronovou sítí vypočítaného zdánlivého posunu zobrazeny v Obr. 111.



Obr. 111 Porovnání skutečné a modelované velikosti zdánlivého posunu bodu T1

Graf potvrzuje statistická data a ukazuje, že hlavní trend vývoje vlivu refrakce se pomocí neuronové sítě podařilo odhalit. Vidíme, že v tréninkové množině nedochází k dokonalému přilnutí modelovaných hodnot, což ukazuje na odhalení obecných vztahů mezi neurony. Pokud by došlo k přeučení modelu, pak by přimykání v oblasti tréninkové množiny bylo téměř dokonalé, ale v oblasti mimo ni by docházelo k fatálnímu selhání, což zde nepozorujeme. Naopak jak statistická data, tak graf ukazují, že míra přimykání je prakticky stejná jak pro tréninková, tak pro testovací data. V čase od zhruba 6:00 do cca 9:00 pozorujeme odklon obou křivek, v ostatním průběhu dochází k nalezení pomyslné střední hodnoty v rámci grafu. V čase okolo 1:30, kdy měřený zdánlivý posun vykazoval velkou výchytku, se modelu podařilo na tento jev reagovat, ačkoli v tomto případě se jedná jen o potlačení vlivu v rozsahu cca 30 %. Nicméně tento jev lze považovat za extrémní a bylo by překvapivé,



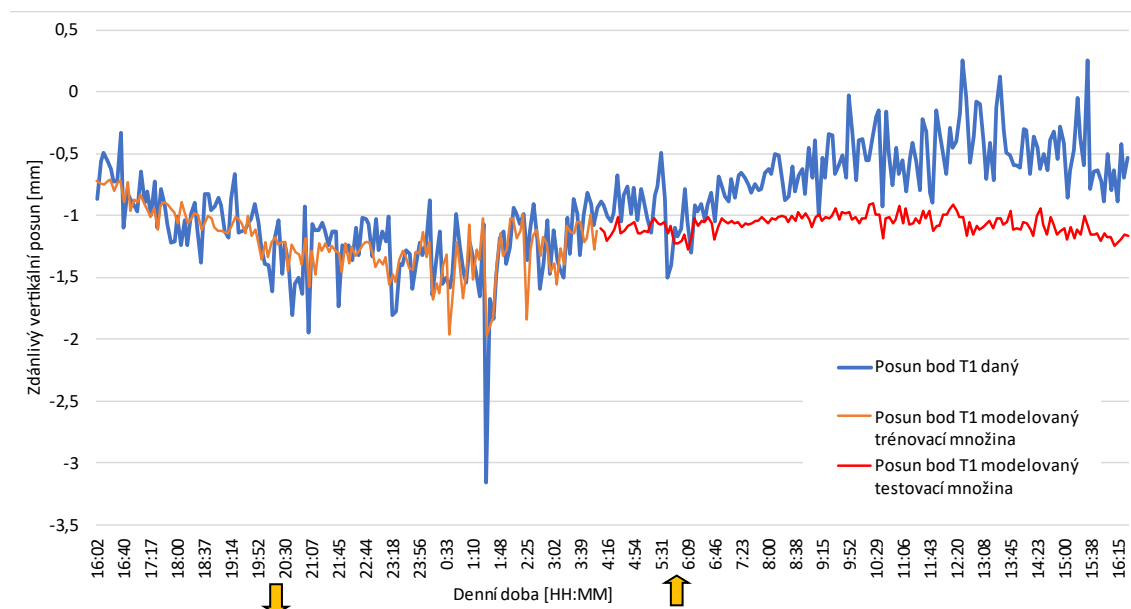
pokud by se mu model přizpůsobil více, vezmeme-li v potaz, že se jedná o jediný výskyt v rámci souboru dat, a tudíž neexistuje jeho protějšek v tréninkové množině.

Je potřeba si uvědomit, že model počítal ověřovací data v čase od cca 00:00 do cca 12:00, pro která ovšem nemá vhodná tréninková data (není v tréninkové množině podchycen stav atmosféry v tomto čase například z jiného dne), což jen dokazuje velkou spolehlivost modelu. Korelační koeficient reálných hodnot zdánlivého posunu a modelovaných vychází 0,86 pro trénovací a 0,84 pro testovací množinu.

V tuto chvíli je řešení modelu v principu časově interpolační, jelikož máme definovanou tréninkovou množinu jak před, tak po měření. V případě, že by nebyla k dispozici tréninková množina v čase po testovací množině, by se obecně jednalo o časově extrapolaci model. Pro představu byl vypočítán model se stejným nastavením a s velikostí trénovací množiny z měření [1:150] a se zbytkem použitým pro testovací množinu [151:308]. Výsledný graf posunů a jeho statistické hodnocení je uvedeno v Obr. 112 a Tab. 39.

Tab. 39 Statistické hodnocení časového extrapolaci modelu

Počet neuronů	3
RMS tréninková množina [mm]	0,224
RMS testovací množina [mm]	0,524
Prům. abs. odchylka trén. [mm]	0,175
Prům. abs. odchylka test. [mm]	0,453
Korelace trénovací množina	0,74
Korelace testovací množina	0,32



Obr. 112 Časová extrapolaci varianta modelu

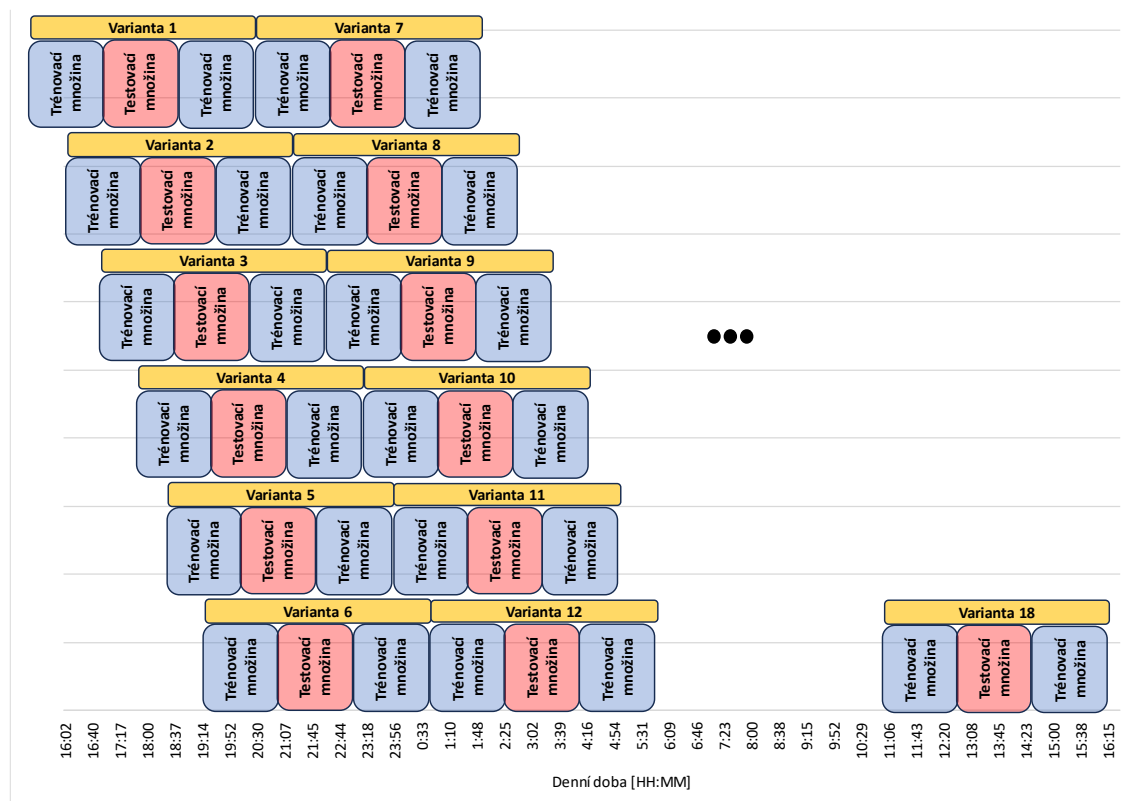


Z grafu je jasně viditelná odchylka, která postupně od konce učící fáze narůstá až do stavu, kdy jsou modelované zdánlivé posuny prakticky dvojnásobně velké než reálné. Z toho plyne nutnost koncového měření pro potřeby trénování modelu.

Nicméně nám výpočet interpolačního modelu dokázal, že je možné aplikovat diferenční metodu na takový typ měřické úlohy a můžeme očekávat velmi dobré výsledky. Nicméně pro lepší aplikovatelnost v praxi je vhodné uvést ještě variantu popisující různě zadané (omezené) tréninkové a testovací množiny. Zejména omezení časové náročnosti (datasetu) z rozsahu cca 25 hodin na klasickou měřickou úlohu (například zátěžovou zkoušku) čítající řádově hodiny.

8.8.4.3.4 Výpočty plovoucího časového okna

Aby bylo možné prohlásit, že je metoda vhodná k praktickému použití (za daných podmínek), je potřeba ukázat její platnost na celém rozsahu dat. V tomto případě se toho dosáhne pomocí rozdělení celodenního experimentu na řadu menších bloků. Aby bylo možné rozumně natrénovat model, je potřeba větší množství dat, a tak byl zvolen rozsah bloku 25 etap (cca 100 minut). Plovoucí okno pak bylo nastaveno tak, aby startovalo vždy po 13 etapách. Tím vznikne 18 bloků, které je možné pak využít pro jednotlivé varianty výpočtu podle schéma Obr. 113. Přičemž blok je složen z tréninkové množiny (prvních 25 etap), následuje ověřovací množina (25 etap) a blok ukončuje druhá trénovací množina (opět 25 etap). Tento blok se pak v rámci celého souboru dat pohybuje po 13 etapách a tím vznikne 18 variant výpočtu.



Obr. 113 Schéma plovoucího okna



ČVUT v Praze – Fakulta stavební
Disertační práce – Měřické experimenty

Výpočet byl realizován s nastavením pro 3 a pro 10 neuronů s tím, že ve vstupní množině byly pro první tabulku Tab. 40 pouze posuny bodu T2.

Tab. 40 Statistické hodnocení výpočtu posuvného okna pro zadané T2

Varianta	Počet neuronů skryté vrstvy = 3				Počet neuronů skryté vrstvy = 10			
	RMS tréninková množina [mm]	RMS testovací množina [mm]	Prům. abs. odchylka trén. [mm]	Prům. abs. odchylka test. [mm]	RMS tréninková množina [mm]	RMS testovací množina [mm]	Prům. abs. odchylka trén. [mm]	Prům. abs. odchylka test. [mm]
1	0,217	0,166	0,180	0,144	0,221	0,162	0,179	0,138
2	0,200	0,247	0,155	0,194	0,200	0,242	0,156	0,190
3	0,182	0,269	0,147	0,205	0,182	0,266	0,147	0,204
4	0,198	0,256	0,160	0,200	0,198	0,258	0,160	0,200
5	0,287	0,250	0,204	0,162	0,290	0,249	0,204	0,163
6	0,287	0,185	0,182	0,157	0,287	0,184	0,182	0,155
7	0,201	0,369	0,169	0,199	0,201	0,379	0,167	0,209
8	0,252	0,199	0,177	0,162	0,255	0,192	0,178	0,157
9	0,258	0,188	0,178	0,160	0,260	0,190	0,175	0,164
10	0,188	0,173	0,150	0,142	0,187	0,167	0,150	0,136
11	0,155	0,209	0,127	0,152	0,155	0,209	0,129	0,152
12	0,154	0,211	0,118	0,154	0,155	0,219	0,118	0,163
13	0,203	0,120	0,157	0,097	0,204	0,124	0,158	0,100
14	0,200	0,166	0,156	0,135	0,200	0,169	0,153	0,136
15	0,182	0,203	0,143	0,164	0,183	0,204	0,144	0,165
16	0,253	0,213	0,202	0,168	0,252	0,213	0,203	0,171
17	0,243	0,236	0,197	0,193	0,243	0,230	0,196	0,189
18	0,212	0,316	0,167	0,260	0,213	0,318	0,167	0,261



Ve druhé variantě (zobrazené v Tab. 41) byly na vstupu uvažovány parametry dříve vyhodnocené jako vhodné – zdánlivý posun bodu T2, denní doba, průběžný čas experimentu a teplota v úrovni trajektorie měřená na soupravě S1.

Tab. 41 Statistické hodnocení výpočtu posuvného okna pro 4 vstupní parametry

Varianta	Počet neuronů skryté vrstvy = 3				Počet neuronů skryté vrstvy = 10			
	RMS tréninková množina [mm]	RMS testovací množina [mm]	Prům. abs. odchylka trén. [mm]	Prům. abs. odchylka test. [mm]	RMS tréninková množina [mm]	RMS testovací množina [mm]	Prům. abs. odchylka trén. [mm]	Prům. abs. odchylka test. [mm]
1	0,212	0,162	0,174	0,142	0,213	0,160	0,175	0,140
2	0,197	0,252	0,148	0,199	0,198	0,240	0,156	0,189
3	0,178	0,269	0,144	0,207	0,177	0,275	0,144	0,209
4	0,192	0,276	0,156	0,217	0,192	0,281	0,157	0,227
5	0,279	0,209	0,202	0,165	0,276	0,216	0,202	0,165
6	0,252	0,301	0,178	0,236	0,253	0,302	0,179	0,237
7	0,195	0,375	0,159	0,204	0,196	0,387	0,159	0,216
8	0,246	0,201	0,170	0,166	0,247	0,192	0,167	0,163
9	0,256	0,184	0,172	0,156	0,257	0,185	0,170	0,158
10	0,184	0,187	0,146	0,162	0,185	0,204	0,148	0,183
11	0,148	0,224	0,120	0,168	0,149	0,221	0,121	0,165
12	0,150	0,227	0,115	0,168	0,147	0,231	0,114	0,172
13	0,194	0,126	0,147	0,100	0,192	0,132	0,147	0,106
14	0,184	0,168	0,140	0,132	0,184	0,166	0,141	0,131
15	0,180	0,193	0,142	0,155	0,181	0,197	0,143	0,155
16	0,224	0,220	0,175	0,173	0,225	0,220	0,175	0,172
17	0,231	0,236	0,186	0,190	0,229	0,238	0,185	0,192
18	0,212	0,311	0,168	0,255	0,212	0,310	0,168	0,256

Z obou tabulek je vidět, že i zde je překvapivě dobře podchycen obecný vzorec definovaný modelem a výsledky jsou dobré a poměrně nezávislé na počtu použitých neuronů. Naopak je zde vidět, že v některých časech se ověřovací množina odchyluje více než v jiných. V nočních hodinách se výpočet poměrně stabilně pohybuje okolo průměrné absolutní odchylky 0,16 mm, naopak v denní fázi dosahuje hodnot přes 0,20 mm. Největší chybu vykazuje poslední varianta. Přesto ve všech variantách dochází k správné opravě vlivu refrakce, a to v řádu cca 60 až 80 % celkového vlivu. Stejně tak zde vidíme, že výsledky pro výpočty provedené jen za pomoci posunu referenčního bodu (T2) jsou prakticky srovnatelné s výsledky poskytovanými modelem se vstupními hodnotami zahrnující posun bodu T2, denní dobu, průběžný čas měření experimentu a jedné teploty. Průměrné absolutní opravy neposkytují jednoznačnou odpověď, která z variant vstupních dat je přesnější. Vzhledem k tomu, že výše zmíněné vstupní hodnoty se dají měřit poměrně snadno (časy se ukládají do paměti přístroje automaticky a teplotu lze měřit snadno průběžně na jednom bodě), bych se osobně přiklonil k této variantě. Ta by ve své podstatě měla být vhodnější, jelikož dojde díky



většímu množství validních vstupních parametrů k automatickému omezování vzniku chyb, které by přímo souvisely s měřením na referenční bod. Výsledky sice nebudou obecně vždy lepší než pro variantu s jednodušším souborem vstupních dat, ale dají se považovat za věrohodnější. Navíc je vždy možné propočítat pro kontrolu obě možnosti a následně je porovnat.

8.8.4.3.5 Polohově extrapolační výpočet vlivu bodu T1 na T2

Z výše uvedeného je vidět, že možnost výpočtu vlivu refrakce působícího na bod T1 ze znalosti současného vlivu refrakce na referenční bod T2 je možný a spolehlivý za daných podmínek. Na mysl se dříve otázkou, zda by bylo možné vypočítat vliv obrácené závislosti – uvažujeme-li bod T1 jako referenční a T2 jako určovaný. V této úvaze se úloha v principu mění z interpolační (znám celkový vliv a usuzuji poměrový) na polohově extrapolační, kdy znám jen jeho část a snažím se určit vliv větší délky (páky).

Ze základní úvahy je zřejmé, že tento přístup bude méně přesný, jelikož jde o podobný případ jako například u polární metody, kdy se orientace volí ve větší vzdálenosti než bod měřený, aby se případná chyba zaměření orientace projevila menší hodnotou (pákou) na bod měřený.

Pro tento výpočet byla použita opět varianta plovoucího okna s nastavením pro 3 neurony skryté vrstvy a ve dvou variantách vstupních dat. V první variantě uvažujeme pouze zdánlivý posun bodu T1 a ve druhé navíc již prověřené parametry – denní doba, průběžný čas experimentu a jednu měřenou teplotu na soupravě S1. Výsledky pro tyto výpočetní modely jsou prezentovány v Tab. 42.



Tab. 42 Statistické hodnocení polohově extrapoláčního modelu

Varianta	Vstup = posun T1, denní doba, průběžný čas exp., teplota S1				Vstup = posun T1			
	RMS tréninková množina [mm]	RMS testovací množina [mm]	Prům. abs. odchylka trén. [mm]	Prům. abs. odchylka test. [mm]	RMS tréninková množina [mm]	RMS testovací množina [mm]	Prům. abs. odchylka trén. [mm]	Prům. abs. odchylka test. [mm]
1	0,806	0,792	0,773	0,783	0,796	0,798	0,793	0,796
2	0,954	0,862	0,922	0,857	0,892	0,908	0,892	0,908
3	0,958	0,881	0,934	0,871	0,964	0,981	0,963	0,980
4	1,003	0,975	0,986	0,974	0,975	0,963	0,974	0,963
5	1,045	1,004	1,027	0,988	1,020	1,037	1,010	1,036
6	1,094	1,005	1,082	0,993	1,078	1,074	1,067	1,073
7	1,110	1,126	1,105	1,103	1,097	1,053	1,096	1,032
8	1,036	0,999	1,018	0,992	1,040	1,053	1,030	1,053
9	0,988	0,964	0,971	0,963	0,996	0,998	0,986	0,997
10	0,931	0,962	0,921	0,961	0,928	0,902	0,928	0,902
11	0,860	0,855	0,839	0,844	0,830	0,851	0,826	0,847
12	0,810	0,752	0,768	0,741	0,747	0,782	0,746	0,780
13	0,674	0,709	0,607	0,694	0,624	0,600	0,617	0,598
14	0,621	0,433	0,559	0,406	0,537	0,485	0,523	0,480
15	0,529	0,470	0,456	0,446	0,432	0,411	0,429	0,408
16	0,472	0,410	0,419	0,353	0,397	0,393	0,375	0,380
17	0,402	0,329	0,331	0,275	0,398	0,350	0,339	0,295
18	0,272	0,349	0,228	0,301	0,265	0,358	0,226	0,310

Z tabulky je zřejmé, že opět nejde jednoznačně prohlásit, která z variant zadání vstupních dat do modelů je vhodnější – řádově jsou prakticky stejné. Nicméně oproti předchozímu výpočtu zde vidíme razantní nárůst odchylek, které se téměř pětkrát zvětšily. To lze přičíst principu extrapoláčního výpočtu (kdy se případná chyba z bližšího referenčního bodu T1 pákou přenesse do výpočtu vzdálenějšího bodu T2) a dále tomu, že měřené zdánlivé posuny bodu T2 jsou samozřejmě v absolutní hodnotě větší než na T1. Velikost průměrné absolutní odchylky dosahující hodnot okolo 1 mm už ovšem nejde považovat za dobrou v případě, kdy se měřený zdánlivý posun pohybuje okolo nuly (jak je vidět v nočních hodinách). Naopak ve druhé polovině experimentu, kdy zdánlivý posun dosahuje hodnot okolo 2 mm, se podařilo naučit model lépe a absolutní průměrné odchylky se pohybují okolo 0,3 až 0,5 mm. V tomto případě se již jedná o znatelné zlepšení výsledků.

Celkově vzato se potvrdila domněnka, že polohově extrapoláční postup, kdy z bližšího referenčního bodu (T1) určují posuny vzdálenějšího pozorovaného bodu (T2), není obecně vhodný, jelikož vykazuje výrazně větší chybovost z výše uvedených důvodů.



8.8.5 Závěry experimentu

Tento měřický i výpočetní experiment nám ukázal cestu, která by šla prakticky použít v geodetické úloze měření zátěžové zkoušky (například mostu). Před samotnou zkouškou by došlo k volbě bodu/ů referenčních, které budou stabilní, mimo deformační zónu po dobu zkoušky a jsou ve směru bodů pozorovaných (například za mostem). Pro tyto referenční a také pro pozorované body by se určila skutečná výška například pomocí nivelace (bylo by známé výchozí převýšení vztažené k totální stanici bez vlivu refrakce). Následně by se nechala totální stanice automaticky měřit převýšení (s vlivem aktuální refrakce) v krátkých etapách (před začátkem zátěžové zkoušky – například v rozsahu 2 hodin, jak plyne z našeho testování). Z tohoto souboru měření by následně byla určena první část trénovací množiny. Měřická úloha by pokračovala měřením převýšení v rámci zátěžové zkoušky, pro kterou by se určované body (u kterých nastává reálný posun vlivem zatížení konstrukce) považovaly za proměnné a body referenční za stabilní. Po skončení zátěžové zkoušky (po ustálení konstrukce) by bylo vhodné opět měřit automaticky několik etap (například opět v rozsahu 2 hodin), abychom vytvořili podmínky pro interpolační variantu modelu s měřením před a po.

Následné zpracování by bylo obdobné tomu, které je popsáno výše. Z učící množiny (tvořené měřením před a po zátěžové zkoušce) bychom naučili model neuronové sítě na vztah mezi zdánlivým posunem bodů pozorovaných a bodů referenčních. Bylo by vhodné vyzkoušet více modelů (s různým počtem neuronů) s ohledem na ověření stability výpočtu. Následně bychom výsledný model použili na data z doby měření zátěžové zkoušky, a tak bychom získali modelovaný zdánlivý posun (způsobený refrakcí pro každou z etap zátěžové zkoušky) bodů pozorovaných, který by bylo nutné odečíst od naměřených posunů v průběhu zátěžové zkoušky. Tímto bychom prakticky dostali reálné výsledné posuny závislé jen na zátěžové zkoušce bez vlivu refrakce.

U běžných zátěžových zkoušek není předmětem sledování samotná výška, ale její změna oproti nulté etapě, která zpravidla probíhá v rámci jednoho dne. Díky tomu by bylo možné z předchozí představy zcela vynechat proces nivelace (a určení absolutního okamžitého vlivu refrakce), a tak bychom získali jen relativní změny způsobené refrakcí vztažené k nulté etapě. Díky tomu se měřická část značně zjednodušuje a prakticky se stává velmi snadno aplikovatelnou pro běžné zátěžové zkoušky.



9 Závěr

Během prvních dvou let doktorského studia bylo provedeno množství měření se sadou dvanácti termočlávkových čidel typu *K* (viz kapitola 8.1), kterými již katedra disponovala. Jelikož v daný okamžik nebyly známy reálné přesnosti čidel a jejich použitelnost pro měření s cílem určování refrakce, tak první experimenty směřovaly především na stanovení optimálního měřičského postupu umožňujícího měření vertikálního teplotního gradientu. Po seznámení s problematikou a naměření dostatečně velkého souboru bylo usouzeno, že se data jeví poněkud nepřesně a neprokazují očekávané vztahy. Vystala tedy potřeba ověřit přesnost a spolehlivost čidel jako takových. To bylo docíleno kalibračními experimenty s použitím odporového čidla. Z výsledků těchto pokusů bylo zřejmé, že termočlávková čidla reálně nemohou určit teplotu s takovou přesností, jaká je potřeba. Hlavním důvodem je jejich nespolehlivost v rámci udržení přesnosti a nestálost kalibračních parametrů.

V návaznosti na tato zjištění byla pořízena sada čidel na jiném fyzikálním principu – čidla odporová v platinovém provedení Pt1000. Jejich přesnost se v běžných teplotách pohybuje do 0,2 °C. První pořízenou variantou byly senzory zapouzdřené (viz 6.1.1.1), které ovšem, jak bylo v návazných experimentech prokázáno, reagují vlivem svého ochranného krytu pomalu na změnu teploty. Proto bylo po konzultaci s odborníky zvoleno jiné technické provedení tohoto čidla, a to varianta zalitá v laku (viz 6.1.1.2). Pro tato čidla byla nově navržena nosná a stínící konstrukce (kapitola 6.2.2), aby bylo možné danou soupravou určovat vertikální teplotní gradient v prostoru. Tato souprava pak sloužila ve většině následujících experimentů, ačkoli se dočkala jistých úprav, které měly za úkol minimalizovat vliv konstrukce na měřenou teplotu (což bylo několikrát testováno). Tímto více méně experimentálním iterativním postupem bylo docíleno vytvoření soupravy pro měření vertikálního teplotního gradientu, který je obecně vhodný pro interpretaci refrakce v oblasti geodézie.

Jedním z nejrozsáhlejších výzkumů bylo periodické roční měření teploty a teplotního gradientu ve vertikálním směru (kapitola 8.3) v rozsahu do dvou metrů nad terénem a s intervalem cca 15 dní. Každé měření probíhalo kontinuálně po dobu minimálně 24 hodin, aby bylo možné posuzovat denní trend vývoje teploty a gradientu. Z naměřených dat je patrné, že v noci se teplota ve vertikálním směru srovná a klesá až do rozbřesku. Nicméně i během noci je velmi často pozorován teplotní gradient, který je navíc stabilní a poměrně systematický. To by pro geodetická měření mělo za následek, že by bylo celé měření zatíženo více méně systematickou chybou. Tudíž obecně zažitý přístup, že měření během noci je přesnější z důvodu absence refrakce, není vždy jistý, ačkoli samotný nominální vliv refrakce je obecně nižší. Nejvýraznější rozvrstvení teploty nastává během denního maxima, kdy zároveň dochází i k největším skokům teploty, ale také k poruchám teplotního uspořádání. To je dáno velmi turbulentní atmosférou, která se rychle a často skokově vyvíjí. Měření během tohoto období může způsobit velké chyby, jelikož měřené gradienty dosahovaly také hodnot přes 3 °C/m. Takový gradient může způsobit na měřenou délku 50 m vertikální zdánlivý posun více než 3 mm, přičemž taková hodnota při přesnosti dnešní inženýrské geodézie nemůže být zanedbána. Tento výzkum je v moderní době svým rozsahem ojedinělý a poskytuje geodetům představu o teplotě, vertikálním teplotním gradientu a přeneseně



i dosažitelné přesnosti měření v průběhu celého roku v našich zeměpisných podmínkách. Výsledky také dokazují, že nastává jisté vertikální rozvrstvení atmosféry (stratifikace), ale je obecně v přízemní úrovni atmosféry mnohem méně spolehlivé, než jak je to běžně uvažováno ve většině dosavadních prací. Reálně nastává při slunných dnech stav, kdy vliv podkladu výrazně překonává jinak obecně panující kladný teplotní gradient v úrovni do cca 0,5 m nad terénem. Je také zajímavé, že gradient v nejbližší výšce měření (mezi 0,5 až 1,5 m nad povrchem) je poměrně malý, jelikož se velmi často vruší vlivem zmíněného vyzařování povrchu. To je nejspíše také jeden z důvodů, proč se obecně v oblasti inženýrské geodézie vliv refrakce projevuje méně, než by měřená data napovídala. V posledním pozorovaném výškovém rozsahu (od 1,5 do 2,0 m nad terénem) se pak zpravidla lépe projevuje stratifikace ve formě kladného teplotního gradientu. Výsledky také poukazují na to, že není možné jednoduše předpokládat vývoj teploty s úmyslem jeho využití pro odhalování refrakce, ale je nutné minimálně vertikální teplotní gradient přímo měřit (na vhodné konstrukci) a z naměřených dat následně například odvozovat vhodnou dobu pro měření.

V kapitole 7.2.1.5 jsou pro představu demonstrovány teoretické zdánlivé vertikální posuny, které reálně může tepelné rozvrstvení způsobit (vycházíme-li ze skutečně dosažitelných gradientů). Byla zde také porovnána přesnost simulací výpočtu zdánlivého posunu pro čtyři uvedené metody (zjednodušenou rovnici profesora Böhma, vzorec odvozený v Kharaghanim, aplikaci Snellova zákona v diferenciální podobě a DRPV). Pro tento účel byl sepsán soubor výpočetních skriptů, které ze zadaných teplotních gradientů (a mnoha dalších parametrů) vypočítají očekávaný zdánlivý posun. Z hlediska přesnosti a obecnosti vychází nejlépe model založený na DRPV, ačkoliv za obvyklých atmosférických podmínek poskytují dostatečně přesné výsledky i ostatní modely. Největším nedostatkem jednoduchých gradientních modelů je předpoklad konstantního gradientu po celé dráze paprsku. Tento předpoklad byl prakticky zamítnut u patřičných měření dvojicí a později i čtveřicí souprav. Z uvedených výpočtů je opět patrné, že vliv refrakce nelze obecně zanedbat, pokud se pokoušíme dodržet vyšší přesnost v řádu milimetrů.

Dalším specifickým a poměrně ojedinělým experimentem bylo měření se čtyřmetrovou latí (kapitola 8.5), pro kterou byla s nemalými problémy navržena a sestrojena upravená verze nosné a stínící konstrukce. Toto měření mělo za úkol odhalit, jak se dále vyvíjí teplota v úrovni od 2 metrů nad terénem. Výzkum odhalil, že ve vyšších úrovních se stratifikace projevuje vyšší měrou než v nejnižší úrovni, kde je mnoho náhodných vlivů a také systematický vliv sálání podkladu. To by obecně mělo znamenat, že je vliv více systematický (a to také z hlediska jeho časového vývoje). Tento experiment vysvětluje, proč v rámci měření v trigonometrických sítích (jak je prováděl například Gauss) mohl být refrakční koeficient považován za konstantní (ať pro celé měření či pro záměru), jelikož se tak ve vyšší výšce nad terénem opravdu jeví. Stejně tak ale v souvislosti s předchozím ročním experimentem ukazuje na nevhodnost použití jednotného refrakčního koeficientu pro oblast inženýrské geodézie, jak někdy bývá na našem území chybně interpretován. Proto vzhledem k přílišnému zjednodušení problematiky autor používání refrakčního koeficientu pro tuto oblast nedoporučuje.

Po dostatečném ověření použité aparatury a připravení vhodných výpočetních skriptů bylo potřeba ověřit, zda je tedy možné měřením teplotního gradientu na daných



soupravách určit teplotní (gradientní) pole dostatečně přesně, aby bylo možné na jeho základě vypočítat opravy geodetického měření či alespoň předpovídat vliv či hrozbu významné chyby způsobenou refrakcí.

Pro tento účel byl přichystán celodenní experiment (kapitola 8.6) kombinující měření totální stanicí a současné určování teploty na dvou místech měřené trajektorie (na začátku a na konci). Výsledné převýšení určené totální stanicí (zatížené refrakcí), bylo porovnáno s převýšením určeným nivelací (bez vlivu refrakce) a také s převýšením vypočítaným simulací průchodu paprsku (uvážující měřené teplotní gradienty). Tento experiment byl navržen tak, aby bylo měření prokazatelné a aby byl výsledný vertikální posun způsoben čistě vlivem refrakce bez dalších vlivů (například změna výšky totální stanice či cíle). Výsledky tohoto experimentu bohužel prokázaly, že podmínění (měření dvojicí souprav) nedostačuje k podchycení atmosféry v dané oblasti. Tyto výsledky ještě více poukázaly na náhodnost a proměnlivost teplotního gradientu, a tak bylo potřeba vrátit se k měření teploty a přezkoumání předpokladů stratifikace a homogenity teplotního gradientu v přízemní úrovni atmosféry.

Za tímto účelem byly dokoupeny další dvě sady teplotních čidel a vyrobeny další konstrukce. Na těchto 4 sadách byla následně provedena dvě celodenní měření (jedno během slunného dne a druhé během oblačného) a byl pozorován horizontální vývoj vertikálního teplotního gradientu (kapitola 8.7). Toho bylo prakticky docíleno tím, že byly soupravy umístěny v řadě za sebou v rozestupu 3 metrů a probíhal na nich současný odečet teplot. Tyto teploty a jejich gradienty byly následně porovnány s konstatováním, že během slunného dne dochází ke korelaci v nejnižší úrovni (do 0,5 m), ale v ostatních úrovních jsou gradienty více méně náhodné. Během oblačného dne byla naopak sledována korelace v oblasti nejvyšší (1,5 až 1,9 m). Ani v těchto případech ale nejsou dané korelační koeficienty tak významné, jak se očekávalo, a navíc zde nepanuje žádný významný horizontální trend. Z toho vyplývá, že předchozí experiment měl jen velmi malou šanci na úspěšné podchycení vlivu refrakce, protože atmosféra v této úrovni se chová významně nestále a diskrétním měřením ji není možné vhodně popsat. Jedna souprava (vertikální gradient měřený na daném místě) definuje sice s dostatečnou přesností své teplotní poměry, ale ty mohou být zcela odlišné od hodnot určených v těsné blízkosti několika metrů.

Na podkladě těchto zjištění byl připraven upravený pokus (kapitola 8.8), který měl za úkol ověřit předchozí zjištění (s použitím všech 4 souprav) a vyzkoušet nově navrhnoutou diferenční metodu výpočtu. Realizace pokusu byla velmi podobná, jako u pokusu v 8.6, ale navíc byl osazen druhý cílový bod, který byl považovaný z hlediska výpočtu diferenční metody jako referenční. Výsledky dosažené výpočty uvažujícími pouze měření teplot selhaly (DRPV...) podobně jako v předchozím pokusu. Tím byl prokázán očekávaný předpoklad, že atmosféra je příliš složitá a proměnná, než aby ji bylo možné reálně použitelným počtem čidel popsat s dostatečnou přesností. Výpočet pomocí diferenční metody ovšem poskytl významně lepší výsledky, a tím prokázal svou aplikovatelnost a správnost jejího základního předpokladu, který uvažuje přízemní úroveň atmosféry jako celek a nepokouší se ji popsat pomocí diskrétního měření čidly. Tento přístup využívající neuronových sítí dokázal opravit měřená data s průměrnou absolutní odchylkou do 0,25 mm, což je u působeného zdánlivého posunu cca 1,25 mm zhruba 80 % celkového vlivu a lépe. Nicméně jak je popsáno výše, tato metoda je aplikovatelná v geodézii téměř výhradně u etapového měření (například



při měření zátěžových zkoušek), jelikož vyžaduje přípravu tréninkové množiny dat, nad kterou se vypočítá model neuronové sítě. Nejde tedy o obecné řešení refrakce, ale o návrh relativně snadno aplikovatelného řešení na jednu z obvyklých úloh inženýrské geodézie. Nicméně se dá předpokládat, že aplikací úvahy o vlivu atmosféry na geodetická měření, která byla použita při návrhu této diferenční metody, by bylo možné nastínit i další měřické a výpočetní postupy použitelné v dalších geodetických úlohách.

Závěrem je třeba říci, že refrakce, působící nepříznivým vlivem na geodetická měření, se v dnešní době stává prakticky přesnostním omezením, jelikož přesné geodetické přístroje sami o sobě umožňují měřit na milimetry či přesněji. Přesto je tento problém v praxi jen málo uvažován a k jeho zvažování zpravidla dochází, až „když měření nevychází“, místo toho, aby byl uvažován předem a bylo s ním počítáno.

V nejvyšší odborné či akademické sféře je snaha o potlačování či dokonce odstraňování vlivu refrakce dlouhodobě vytyčeným cílem. Stávající postupy zatím neumožňují dosáhnout dostatečně přesných výsledků anebo nejsou obecně platné. Tato práce si od samého začátku nekladla tak vysoké cíle a soustředila se především na sbírání relevantních dat popisujících teplotní uspořádání v přízemní úrovni atmosféry. V tomto ohledu se cíle podařilo splnit, jelikož bylo uskutečněno více než 50 měřických pokusů (z nichž jejich část je publikována zde), které upozornily na nepravdivost či neúplnost některých zažitých předpokladů a zároveň umožnily si utvořit představu o změnách teploty (a přeneseně i vlivu refrakce) za různých okolností. V konečné fázi výzkumu se bohužel podařilo prokázat, že je daná problematika významně složitější a jednodušším, ač přesným a precizním měřením teploty není možné adekvátně vyhodnocovat refraktivní vlastnosti atmosféry. Tento poznatek také mimoděk poukazuje na chybné předpoklady, které jsou uvažovány v mnoha pracích zabývajících se potlačováním vlivu refrakce. V reakci na toto neradostné zjištění autor práce navrhl na základě všech svých zkušeností a nabytých znalostí novou metodu, s jejíž pomocí se mu podařilo prokazatelně a významně potlačit vliv refrakce u jedné z obvyklých metod inženýrské geodézie a vytyčit směr dalšího bádání, které bude jistě dále potřeba učinit.



10 Zdroje

[1] HAUF, M. et al.: Technický průvodce: Geodzie. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1982.

[2] BRAUN, J., ŠTRONER, M.: Geodetic Measurement of Longitudinal Displacements of the Railway Bridge. *Geoinformatics FCE CTU*, 2014, 12, p. 16-21. ISSN 1802-2669. doi: 10.14311/gi.12.3.

[3] BRAUN, J. et al.: Comparison of Different Measurement Methods of Crane Runway, In: *Advances and Trends in Geodesy, Cartography and Geoinformatics II*. Londýn: Taylor & Francis Group, 2020, p. 3-9. doi: 10.1201/9780429327025-2. ISBN 978-0-367-34651-5.

[4] BUREŠ, J. et al.: Security geodetic monitoring of structures. In: *7th International Conference on Cartography and GIS*. International Conference on Cartography and GIS. 41. Bulgaria: Bulgarian Cartographic Association, 2018, p. 874-879. ISSN: 1314-0604.

[5] BUREŠ, J. et al.: Influence of External Conditions in Monitoring of Building Structures. In: *Contributions to International Conferences on Engineering Surveying*. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. Switzerland: Springer Nature Switzerland AG, 2020, p. 223-235. ISBN: 978-3-030-51952-0.

[6] LIPTÁK, M.; SOKOL, Š.: Možnosti eliminácie vplyvu vertikálnej refrakcie pri trigonometrických meraniach prevýšení. *Geodetický a kartografický obzor, Česká republika*, vol. 54(96)/issue 11, pp 224-229, 2008.

[7] POSPÍŠIL, J.: Vliv atmosféry na měření laserového záření při metodě záměrné přímky. *Geodetický a kartografický obzor, ČSSR*, vol. 26(68)/issue 1, pp 9-14, 1980.

[8] GAUSS, C. F.: *Carl Friedrich Gauss Werke Neunter band*. Göttingen, Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften, 1903.

[9] HRADILEK, L.: Refraction in Trigonometric and Three-Dimensional Terrestrial Networks. *The Canadian Surveyor*. 1972, 26(1), p. 59-70. doi: 10.1139/tcs-1972-0006.

[10] HRADILEK, L.: Trigonometric levelling and spatial triangulation in mountain regions. *Bulletin Geodesique*, 1968, 87, p. 33-52. doi: 10.1007/BF02530312.

[11] URBAN, R., MICHAL, O.: Development deflection of prestressed concrete bridge. In: *15th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2015*. Sofia: STEF92 Technology Ltd., 2015, p. 203-210. ISSN 1314-2704. ISBN 978-619-7105-35-3. doi: 10.5593/SGEM2015/B22/S9.025.

[12] RAKAY, S. et al.: The influence of refraction on determination of position of objects under water using total station. *Advances and Trends in Geodesy, Cartography and Geoinformatics*, 2018, p. 95-100. doi: 10.1201/9780429505645-16.

[13] KŘEMEN, T.: Refrakční koeficient a Gaussova hodnota $k = 0,1306$. *Geodetický a kartografický obzor*. Praha: Český úřad zeměměřický a katastrální, 2018, 64(8), p. 161–169. ISSN 1805-7446.



- [14] ŠTEMPELOVÁ, M.: Riešenie refrakčných vplyvov z trigonometricky meraných prevýšení bodov. Geodetický a kartografický obzor, Česká republika, vol. 39(81)/issue 10, pp 206-210, 1993.
- [15] HIRT, C., GUILLAUME, S.: Monitoring of the refraction coefficient in the lower atmosphere using a controlled setup of simultaneous reciprocal vertical angle measurements, *Journal of Geophysical Research*, vol. 115, 2010.
- [16] KUKKAMAKI, T. J.: Ober die nivellitische Refraktion. Helsinki: Publication of the Finnish Geodetic Institute, 1938.
- [17] HOLDAHL, S.: Removal of refraction errors in geodetic leveling. Symposium – International Astronomical Union, 89, 1979, p. 305–319. doi: 10.1017/S0074180900066134 GAIFILLIA.
- [18] VYSKOČIL, P.: Poměry v mikroklimatu asfaltových silnic na území ČSSR, Geodetický a kartografický obzor, ČSSR, vol. 13(55)/issue 10, pp 261-266, 1968.
- [19] VYSKOČIL, P.: Vliv teploty a refrakce na nivelační měření, Geodetický a kartografický obzor, ČSSR, vol. 10(52)/issue 8, pp 134-137, 1964.
- [20] POSPÍŠIL, J., VITÁSEK J.: Rozbor Kukkamakiho teplotní funkce, Geodetický a kartografický obzor, ČSSR, vol. 28(70)/issue 10, pp 199-201, 1982.
- [21] ANGUS-LEPPAN, P.: Use of meteorological measurements for computing refractive effects - a review. Symposium – International Astronomical Union, 89, 1979, p. 165–178. doi:10.1017/S0074180900065979.
- [22] GAIFILLIA, D. et al.: Empirical Modelling of Refraction Error in Trigonometric Heighting Using Meteorological Parameters. *Journal of Geosciences and Geomatics*, 2016; 4(1):8–14. doi: 10.12691/JGG-4-1-2.
- [23] MONIN A. S., OBUKHOV A. M.: Basic Laws of Turbulent Mixing in the Atmosphere Near the Ground. *Academiai Nauk SSSR. Geofizicheskii institut*, 1954.
- [24] BRUNNER, F. K.: Systematic and Random Atmospheric Refraction Effects in Geodetic Levelling. Proc. of Second International Symposium on Problems Related to the Redefinition of North American Vertical Geodetic Networks, 1980, p. 691–703.
- [25] REITERER, A.: Modeling Atmospheric Refraction Influences by Optical Turbulences Using an Image-Assisted Total Station. *ZFV - Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, 2012, p. 156–165.
- [26] BOECKEM, B. et al.: Refraction influence analysis and investigations on automated elimination of refraction effects on geodetic measurements. Proc. IMEKO 2000, September 25–28, Austria, 2000.
- [27] INGENSAND, H.: Concepts and solutions to overcome the refraction problem in terrestrial precision measurement. *Geodesy and Cartography*, 2008, 34, p. 61–65. doi: 10.3846/1392-1541.2008.34.61-65.
- [28] KYLE, S.: Compensating for the effects of refraction in photogrammetric metrology. In Proceedings of 14th International Workshop on Accelerator Alignment, 3-7 October, France, 2016.



[29] MICHALČÁK, O.; SOKOL Š.: Vplyv atmosferických podmienok na trigonometrické meranie výšok v inžinierskej geodézii, Geodetický a kartografický obzor, ČSSR, vol. 27(69)/issue 3, pp 58-62, 1981.

[30] VESELÝ, M.; VITÁSEK J.: Studie vhodnosti náhradních teplotních rovnic v nehomogenním prostředí, Geodetický a kartografický obzor, ČSSR, vol. 27(69)/issue 7, pp 177-179, 1981.

[31] SIRŮČKOVÁ, H.: Experimental levelling at the interface of optical environments. Acta Polytechnica. 2016, 2016(2), 138-146. ISSN 1210-2709. doi: 10.14311/AP.2016.56.0138.

[32] Numerická analýza šíření světelných paprsků v izotropním optickém prostředí. Online. In: VOLFOVÁ, A a NOVÁK, J. ČVUT v Praze, Fakulta stavební, katedra fyziky, s. 1-10. Dostupné z: http://dsp.vscht.cz/konference_matlab/MATLAB07/prispevky/volfova_novak/volfova_novak.pdf. [cit. 2024-03-13].

[33] SUK, T.: Effect of horizontal thermal gradient on geodetic measurements measurement around the blast furnace. 10.5593/sgem2018/2.2/S09.095.

[34] POSPÍŠIL, J.; VOREL, V.: Temperature Measurements in Geodesy, Technical Papers, Praha: TU of Prague, vol. 2, pp 231-263, 1983.

[35] PELIKÁN, M.: Měření teploty termistorovým teploměrem, Geodetický a kartografický obzor, ČSSR, vol. 10(52)/issue 6, pp 147-149, 1964.

[36] KOPEČNÝ, J.: Fyzika pro bakaláře. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2006. ISBN 80-248-1200-2.

[37] POSPÍŠIL, J.: Geodetická měření při požární zkoušce na experimentálním objektu v Mokrsku. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2008. ISBN 978-80-01-04244-1.

[38] FRK, M.; ROZSÍVALOVÁ, Z.: Overview, accuracy and sensitivity of temperature sensors in practice, Elektrovue, Czech Republic, vol. 14/issue 4, pp 55–1 - 55–8, 2012.

[39] Návod na použití a kalibrační protokol: Temperature sensor TG8 Pt 1000/3850. Rožnov pod Radhoštěm, 2019. Dostupné také z: COMET SYSTEM, s.r.o.

[40] KLEPÁRNÍK, J.: Termočlánky. Jan Klepárník: WEB podpora výuky. Online. Brno: Jan Klepárník [cit. 2019-07-05]. Dostupné z: http://user.mendelu.cz/xklepar0/fls/sn_tcl.htm.

[41] ČIČMANEC, P.: Všeobecná fyzika. 3. dopl. vyd. Bratislava: Univerzita Komenského, 2001. ISBN 80-223-1687-3.

[42] DVOŘÁK, O.; KOLLER, J.: Měření teploty termočlánky při požárních zkouškách. Online. Praha, 2017, 24.4.2017 [cit. 2019-07-30]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/pozarni-bezpecnost-staveb/15663-mereni-teploty-termoclanky-pri-pozarnich-zkouskach>

[43] Návod na použití a kalibrační protokol: Snímače teploty TR097C Pt 1000/3850. Rožnov pod Radhoštěm, 2019. COMET SYSTEM, s.r.o.



[44] Operation manual: 12 channels temperature recorder Model: BTM-4208SD. Min Chuan West Road, Taipei, 2018. Lutron Electronic Enterprise Co., Ltd.

[45] Návod na použití a kalibrační protokol: loggery řady Sxxxx a Rxxxx. Rožnov pod Radhoštěm, 2019. COMET SYSTEM, s.r.o.

[46] COMET SYSTEM, s.r.o. Záznamník teploty pro čtyři externí sondy Pt1000. Online. COMET SYSTEM. 2023. Dostupné z: <https://www.cometsystem.cz/produkty/reg-u0141>. [cit. 2024-02-20].

[47] Návod na použití a kalibrační protokol: Dataloggery řady Uxxxx. Rožnov pod Radhoštěm, 2023. Dostupné také z: COMET SYSTEM, s.r.o.

[48] HORÁK, Z.; ŠINDELÁŘ, V. a KRUPKA, F.: Technická fyzika. 3. vyd. Teoretická knižnice inženýra. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1961.

[49] Index lomu. Online. In: Wikipedia: the free encyclopedia. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Index_lomu. [cit. 2024-02-20].

[50] DVORÁČEK, F.: Nepřímé určení indexu lomu vzduchu pro výpočet fyzikální redukce elektronických dálkoměrů, Geodetický a kartografický obzor, Česká republika, vol. 59(101)/issue 10, pp 253-266, 2013.

[51] ŠTRONER, M.: Metody výpočtu indexu lomu vzduchu, Jemná mechanika a optika. 2000, roč. 45, č. 7–8, s. 224–228. Praha: Fyzikální ústav Akademie věd ČR. ISSN 0447-6441.

[52] BARRELL, H.; SEARS, J. E.: The Refraction and Dispersion of Air for the Visible spectrum. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Serie A, Mathematical and Physical Sciences, Vol. 238, 1939, No. 786. 64 pp.

[53] EDLÉN, B.: The Dispersion of Standard Air. Journal of the Optical Society of America, Vol. 43, 1953, No. 5, pp. 339-344.

[54] CIDDOR, P. E.: Refractive Index of Air: New Equations for the Visible and Near Infrared. Applied Optics, Vol. 35, 1996, No. 9, pp. 1566-1572.

[55] CIDDOR, P. E.; HILL, R. J.: Refractive Index of Air. 2. Group Index. Applied Optics, Vol. 38, 1999, No. 9, pp. 1663-1667.

[56] CIDDOR, P. E.: Refractive Index of Air: 3. The Roles of CO₂, H₂O, and Refractivity Virials. Applied Optics, Vol. 41, 2002, No. 12, pp. 2292-2298.

[57] KHARAGHANI, G. A.: Propagation of Refraction Errors in Trigonometric Height Traversing and Geodetic Levelling. 1. University of New Brunswick: Department of Surveying Engineering, University of New Brunswick, 1987. ISBN 9780315398641.

[58] COOK, A. H.; BOMFORD, G.: Geodesy. 3rd Ed. Clarendon Press, Oxford, Geophysical Journal International, Volume 24, Issue 2, October 1971, Page 210, <https://doi.org/10.1093/gji/24.2.210>.

[59] SHAW, R. H.; SMIETANA P.J.: Research in the field of boundary layer micrometeorology as it impinges on the unequal refraction error on geodetic leveling. Final report, U.S. Geological Survey Contract, 1982.



[60] Snellův zákon. Online. In: Wikipedia: the free encyclopedia. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Snellův_zákon. [cit. 2024-02-20].

[61] Fermatův princip. Online. In: Wikipedia: the free encyclopedia. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Fermatův_princip. [cit. 2024-02-20].

[62] KRAVCOV, J. A.; ORLOV, J. I.: Geometričeskaja optika neodnorodnych sred. Moskva: Nauka, 1980.

[63] MIKŠ, A.: Určení vlivu nehomogenity atmosféry na přesnost měření ve stavebnictví a geodézii. Stavební obzor: odborný měsíčník. Praha: Toma, 1996, č. 4, s. 120 – 121. ISSN 1210-4027.

[64] MIKŠ, A.; POSPÍŠIL, J.: Počítačová simulace vlivu atmosféry na geodetická měření. Stavební obzor: odborný měsíčník. Praha: Toma, 1998, č. 7, s. 220 – 225. ISSN 1210-4027.

[65] ČÚZK. CZEPOS - diferenční GPS. CZEPOS ZÚ. Dostupné z: https://czepos.cuzk.cz/_servicesProducts.aspx. [cit. 2024-02-20].

[66] Diferenciální GPS. Online. In: Wikipedia: the free encyclopedia. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Diferenciální_GPS. [cit. 2024-02-20].

[67] Strojové učení. Online. In: Wikipedia: the free encyclopedia. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Strojové_učení. [cit. 2024-02-20].

[68] GOOGLE FOR DEVELOPERS. Machine Learning Glossary. Online. Google for Developers. Dostupné z: <https://developers.google.com/machine-learning/glossary/#t>. [cit. 2024-02-20].

[69] KŘIVAN, M.: Umělé neuronové sítě. Nakladatelství Oeconomica, Vysoká škola ekonomická v Praze. Dostupné z: <https://www.intelligentsoftware.eu/upload/pdf/Scriptum.pdf>. [cit. 2024-02-20]. ISBN 978-80-245-2420-7.

[70] In-počasí: archiv počasí. Online. InMeteo, 2019 [cit. 2019-08-01]. Dostupné z: <https://www.in-pocasi.cz/archiv/>.

[71] BÖHM, J.: Vyšší geodézie I. Praha, Vydavatelství ČVUT, 1977, 388 s.

[72] Scilab. Online. HRISTEV, R. M. a CORNET, A.: ANN Toolbox. 2018. Dostupné z: <https://atoms.scilab.org/>. [cit. 2024-02-06].

[73] GitLab. Online. Ann-toolbox. 2020. Dostupné z: <https://gitlab.com/>. [cit. 2024-02-06].

[74] User manual: ANN Toolbox. Dostupné z: https://atoms.scilab.org/toolboxes/ANN_Toolbox/0.5/files/ANN_Toolbox_0.5.pdf.



11 Seznam obrázků

Obr. 1 Základní princip refrakce ve 2D prostoru	- 16 -
Obr. 2 Fermatův princip pro lom	- 18 -
Obr. 3 Základní princip Snellova zákona	- 19 -
Obr. 4 Zjednodušené vztahy mezi měřenými a skutečnými veličinami	- 23 -
Obr. 5 Vztahy mezi měřenými a skutečnými veličinami	- 24 -
Obr. 6 Vliv horizontální refrakce	- 25 -
Obr. 7 Schéma zapojení odporového čidla [39]	- 29 -
Obr. 8 Schéma termočlánek typu <i>K</i>	- 31 -
Obr. 9 Předpoklad rozvrstvení teploty v přízemní úrovni atmosféry	- 34 -
Obr. 10 Schéma pro konstantní gradient	- 35 -
Obr. 11 Schéma pro proměnný gradient	- 35 -
Obr. 12 Schéma pro proměnný gradient nad nerovným terénem	- 36 -
Obr. 13 Schéma pro proměnný gradient nad různým povrchem	- 36 -
Obr. 14 Zapouzdřený senzor TG8-40	- 38 -
Obr. 15 Zalitý senzor TR097C	- 38 -
Obr. 16 Stínící konstrukce 1	- 40 -
Obr. 17 Stínící konstrukce – nákres a provedení	- 41 -
Obr. 18 Stínící konstrukce 4 m – nákres a provedení	- 42 -
Obr. 19 Logger LUTRON BTM-4208SD	- 43 -
Obr. 20 Logger S0141	- 44 -
Obr. 21 Logger U0141 [46]	- 45 -
Obr. 22 USB adaptér S0141	- 45 -
Obr. 23 Domovská stránka zařízení (Comet Vision)	- 46 -
Obr. 24 Výpočet vertikálního teplotního gradientu	- 52 -
Obr. 25 Snellův zákon	- 54 -
Obr. 26 Vícenásobný Snellův zákon	- 55 -
Obr. 27 Diferenciální tvar Snellova zákona	- 55 -
Obr. 28 Schéma iterace DRPV	- 58 -
Obr. 29 Schematický princip diferenční metody	- 62 -
Obr. 30 Schéma neuronových sítí	- 65 -



Obr. 31 Schéma učení neuronových sítí s učitelem.....	- 66 -
Obr. 32 Rozmístění pomůcek na střeše	- 70 -
Obr. 33 Naměřené teploty (0,10 m až 1,85 m)	- 71 -
Obr. 34 Naměřené teploty (2,20 m až 3,95 m)	- 71 -
Obr. 35 Rozdíly teplot 1	- 72 -
Obr. 36 Rozdíly teplot 2	- 72 -
Obr. 37 Vybrané teplotní gradienty	- 73 -
Obr. 38 Rozmístění čidel pro porovnání přesnosti a odezvy	- 76 -
Obr. 39 Test rychlosti odezvy odporových senzorů TG8-40.....	- 77 -
Obr. 40 Ukázka měření teploty před kalibrací.....	- 77 -
Obr. 41 Vypočítané kalibrační hodnoty pro daný okamžik měření.....	- 78 -
Obr. 42 Ukázka teplot po zavedení kalibračních hodnot.....	- 78 -
Obr. 43 Rozmístění pomůcek v areálu FSv	- 79 -
Obr. 44 Test čidla TR097C.....	- 80 -
Obr. 45 Rozdíly teplot měřené jednotlivými čidly oproti čidlu TR097C.....	- 81 -
Obr. 46 Měření teploty 1. 1. 2020.....	- 82 -
Obr. 47 Vertikální gradienty 1. 1. 2020	- 83 -
Obr. 48 Měření teploty 21. 3. 2019.....	- 83 -
Obr. 49 Vertikální gradienty 21. 3. 2019.....	- 84 -
Obr. 50 Měření teploty 7. 5. 2020.....	- 84 -
Obr. 51 Vertikální gradienty 7. 5. 2020	- 85 -
Obr. 52 Měření teploty 25. 6. 2019.....	- 86 -
Obr. 53 Vertikální gradienty 25. 6. 2019	- 86 -
Obr. 54 Průměrné gradienty pro 0:00, 4:00 a 8:00 hodin	- 87 -
Obr. 55 Průměrné gradienty pro 12:00, 16:00 a 20:00 hodin	- 88 -
Obr. 56 Vertikální posuny pro $z = 99,2$ gon	- 89 -
Obr. 57 Vertikální posuny pro $z = 100$ gon	- 89 -
Obr. 58 Vertikální posuny pro $z = 101,8$ gon	- 90 -
Obr. 59 Skutečná trajektorie paprsku dne 15. 1. 2020.....	- 91 -
Obr. 60 Skutečná trajektorie paprsku dne 7. 5. 2020.....	- 91 -
Obr. 61 Skutečná trajektorie paprsku dne 26. 10. 2019.....	- 92 -
Obr. 62 Refrakční koeficient pro $z = 99,2$ gon	- 93 -
Obr. 63 Rozmístění pomůcek v areálu FSv, dvě konstrukce.....	- 95 -



Obr. 64 Měření teploty – obě konstrukce.....	- 96 -
Obr. 65 Rozdíly teplot měřených na konstrukcích.....	- 97 -
Obr. 66 Rozdíly vertikálních teplotních gradientů.....	- 97 -
Obr. 67 Průběh teploty 29. 6. 2019	- 99 -
Obr. 68 Teplotní gradienty určené 29. 6. 2019	- 100 -
Obr. 69 Průběh teploty 25. 7. 2019	- 101 -
Obr. 70 Teplotní gradienty určené 25. 7. 2019	- 101 -
Obr. 71 Rozmístění přístrojů a pomůcek	- 103 -
Obr. 72 Schéma výpočtu převýšení pomocí nivelace	- 105 -
Obr. 73 Teploty měřené sadou senzorů S1	- 106 -
Obr. 74 Teploty měřené sadou senzorů S2	- 107 -
Obr. 75 Rozdíly teplot mezi S1 a S2.....	- 107 -
Obr. 76 Teplotní gradienty pro S1 a S2 (výška 1,2 m až 1,7 m) a jejich rozdíl.....	- 108 -
Obr. 77 Správná výška bodu T pro každou z etap	- 109 -
Obr. 78 Zdánlivá výška bodu T pro každou z etap	- 109 -
Obr. 79 Zdánlivý posun bodu T	- 110 -
Obr. 80 Porovnání zdánlivých posunů bodu T a Böhmova vzorce.....	- 112 -
Obr. 81 Porovnání zdánlivých posunů bodu T a Kharaghaniho vztahu.....	- 113 -
Obr. 82 Porovnání zdánlivých posunů bodu T a DRPV	- 115 -
Obr. 83 Porovnání jednotlivých metod výpočtu	- 116 -
Obr. 84 Rozmístění přístrojů a pomůcek	- 117 -
Obr. 85 Měření 11. 6. 2023 – teploty 0,5 m.....	- 118 -
Obr. 86 Měření 11. 6. 2023 – teplotní gradienty 0,5 až 1,0 m	- 119 -
Obr. 87 Měření 11. 6. 2023 – teplotní gradienty 1,0 až 1,5 m	- 119 -
Obr. 88 Měření 11. 6. 2023 – teplotní gradienty 1,5 až 1,9 m	- 120 -
Obr. 89 Měření 21. 7. 2023 – teploty 0,5 m.....	- 121 -
Obr. 90 Měření 21. 7. 2023 – teplotní gradienty 0,5 až 1,0 m	- 122 -
Obr. 91 Měření 21. 7. 2023 – teplotní gradienty 1,0 až 1,5 m	- 122 -
Obr. 92 Měření 21. 7. 2023 – teplotní gradienty 1,5 až 1,9 m	- 122 -
Obr. 93 Rozmístění přístrojů a pomůcek	- 125 -
Obr. 94 Měřené teploty na soupravě S1	- 128 -
Obr. 95 Měřené teploty ve výšce 1,9 m	- 129 -
Obr. 96 Určené gradienty ve výškovém úseku 0,5 m až 1,0 m.....	- 129 -



Obr. 97 Určené gradienty ve výškovém úseku 1,0 m až 1,5 m	- 130 -
Obr. 98 Určené gradienty ve výškovém úseku 1,5 m až 1,9 m	- 130 -
Obr. 99 Výška bodu T1	- 131 -
Obr. 100 Výška bodu T2	- 132 -
Obr. 101 Zdánlivé posuny	- 132 -
Obr. 102 Porovnání zdánlivých posunů bodu T1 a Böhmova vzorce	- 135 -
Obr. 103 Porovnání zdánlivých posunů bodu T2 a Böhmova vzorce	- 136 -
Obr. 104 Porovnání zdánlivých posunů bodu T1 a Kharaghaniho vztahu	- 137 -
Obr. 105 Porovnání zdánlivých posunů bodu T2 a Kharaghaniho vztahu	- 137 -
Obr. 106 Porovnání výpočtu Böhmova vzorce a Kharaghaniho vztahu	- 138 -
Obr. 107 Porovnání zdánlivých posunů bodu T1 a DRPV	- 139 -
Obr. 108 Porovnání zdánlivých posunů bodu T2 a DRPV	- 140 -
Obr. 109 Porovnání metod výpočtů	- 140 -
Obr. 110 Porovnání průměrů abs. odchylek jednotlivých variant	- 144 -
Obr. 111 Porovnání skutečné a modelované velikosti zdánlivého posunu bodu T1	- 147 -
Obr. 112 Časová extrapoláční varianta modelu	- 148 -
Obr. 113 Schéma pohyblivého okna	- 149 -



12 Seznam tabulek

Tab. 1 Vedlejší jednotky teploty	- 26 -
Tab. 2 Základní charakteristiky látek v kapalinových teploměrech.....	- 27 -
Tab. 3 Teoretické chyby výpočtu teploty	- 29 -
Tab. 4 Vliv délky kabelu na výslednou teplotu [39].....	- 30 -
Tab. 5 Přesnost odporových čidel	- 30 -
Tab. 6 Koeficienty pro výpočet teploty – termočlánek typu <i>K</i> [38]	- 32 -
Tab. 7 Přesnost a měrný rozsah čidel typu <i>K</i>	- 39 -
Tab. 8 Přesnost vstupu teploty u loggeru S0141	- 44 -
Tab. 9 Přesnost teplotních gradientů	- 48 -
Tab. 10 Porovnání metod	- 60 -
Tab. 11 Vliv vzdálenosti a teplotního gradientu	- 61 -
Tab. 12 Vliv zenitového úhlu a teplotního gradientu.....	- 61 -
Tab. 13 Vliv vzdálenosti a zenitového úhlu	- 61 -
Tab. 14 Znáhodnění dat.....	- 68 -
Tab. 15 Kalibrace termočlánekových čidel.....	- 73 -
Tab. 16 Kalibrace termočlánekových čidel – změna teploty	- 74 -
Tab. 17 Kalibrace termočlánekových čidel – kolísání teploty.....	- 74 -
Tab. 18 Doplnkové informace k prováděným měřením	- 82 -
Tab. 19 Barvy jednotlivých průchodů.....	- 90 -
Tab. 20 Přesnost teplotních gradientů a jejich rozdílů	- 96 -
Tab. 21 Korelační koeficienty teplotních gradientů.....	- 98 -
Tab. 22 Statistická data souboru	- 98 -
Tab. 23 Statistická data souboru	- 100 -
Tab. 24 Statistická data souboru	- 102 -
Tab. 25 Souřadnice TS1 a T v 0. etapě	- 104 -
Tab. 26 Přesnosti měření totálními stanicemi	- 111 -
Tab. 27 Pomocné parametry.....	- 114 -
Tab. 28 Korelační koeficienty určené mezi sousedními soupravami 11. 6. 2023....	- 120 -
Tab. 29 Korelační koeficienty určené mezi sousedními soupravami 21. 7. 2023....	- 123 -
Tab. 30 Souřadnice TS1, T1 a T2 v 0. etapě.....	- 126 -
Tab. 31 Výšky T1 a T2 v 0. etapě	- 127 -



Tab. 32 Korelace teplotních gradientů.....	- 127 -
Tab. 33 Varianty výpočtu dle Böhmova vzorce	- 135 -
Tab. 34 Varianty výpočtu dle Kharaghaniho vztahu	- 136 -
Tab. 35 Varianty výpočtu dle DRPV	- 139 -
Tab. 36 Varianty vstupních dat.....	- 143 -
Tab. 37 Varianty minimálního vhodného vstupu	- 145 -
Tab. 38 Varianty počtu neuronů skryté vrstvy	- 146 -
Tab. 39 Statistické hodnocení časového extrapoláčního modelu	- 148 -
Tab. 40 Statistické hodnocení výpočtu posuvného okna pro zadané T2	- 150 -
Tab. 41 Statistické hodnocení výpočtu posuvného okna pro 4 vstupní parametry..	- 151 -
Tab. 42 Statistické hodnocení polohově extrapoláčního modelu	- 153 -



13 Seznam zkratk a symbolů

ČÚZK	Český úřad zeměměřický a katastrální
k	refrakční koeficient
z	zenitový úhel
β	refrakční úhel
v	rychlost
s	dráha
T	čas / doba
n	index lomu
L	optická dráha
X, Y, Z	pravoúhlé souřadnice
Δ	rozdíl
∇	gradient
H	výška
ΔH	zdánlivý vertikální posun
h	převýšení
t	teplota
DRPV	Diferenciální rovnice průchodu vlnoplochy nehomogenním prostředím
FSv	Fakulta stavební
ČVUT	České vysoké učení technické v Praze
u_p	koeficient spolehlivosti
σ	směrodatná odchylka
λ	vlnová délka záření
p	atmosférický tlak
e	tlak vodních par
ANN	Umělá neuronová síť (Artificial Neural Network)

V rámci práce jsou uvedeny i další neopakující se proměnné, jejichž význam je vždy uveden přímo v textu.



14 Seznam elektronických příloh

- El. 1 Matlab.zip Výpočetní skripty pro program Matlab k pokusu (8.8)
- spoustecci.m Hlavní výpočetní skript volající funkce
 - Vypocet_teplo_4late.m Funkce připravující data pro výpočet DRPV
 - DRPV_upr_4late.m Iterativní výpočet DRPV
 - Interp_teplo_f_4late.m Funkce zajišťující výpočet teploty v bodě 1/2
 - Interp_teplo_f.m Funkce zajišťující výpočet teploty v bodě 2/2
 - ZfromGRID.m Určení výšky nad povrchem
 - ZpracDvePol.m Zpracuje měření ve dvou polohách
 - TRANS_podobnostni.m Podobnostní transformace bodů
 - TRANS_podobnostni_klic.m Výpočet klíče podobnostní transformace
 - time_find.m Interpoluje měření teploty pro daný okamžik
 - time_find_tlak.m Interpoluje měření tlaku pro daný okamžik
 - smernik.m Výpočet směrníku ze souřadnic
 - sd2vd.m Výpočet vodorovné délky ze šikmé délky
 - s_delka.m Výpočet délky ze souřadnic
 - ref_koef2_delta_h.m Výpočet zdánlivého posunu z ref. koeficientu
 - ref_koef_oprava1.m Výpočet refrakčního koeficientu dle [57]
 - IndexLomu.m Výpočet indexu lomu
 - corrcoef_spoustecci.m Výpočet korelací teplot a gradientů
 - Bohm_postupny.m Böhmův vzorec pro více gradientů
 - bohm.m Böhmův vzorec pro určení zdánlivého posunu
 - XML_nivelace.m Načte a zpracuje měření nivelace
- El. 2 Scilab.zip Vybrané výpočetní skripty pro program Scilab k pokusu (8.8)
- NeurSit_var_5n.sci Výpočet s 5 neurony s různými vstupními daty
 - NeurSit_var_nN.sci Výpočet pro variace počtu neuronů a vrstev
 - NeurSit_var_posun_okno.sci Výpočet pro plovoucí okno